



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Convertidor termoelèctric per el aprobechamiento del calor disipado por el cuerpo humano

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació

AUTOR: Esther Hilinger Pelegrín

DIRECTOR: Oscar López Lapeña

DATA: 19 de setembre de 2008

Título: Convertidor termoeléctrico para el aprovechamiento del calor disipado por el cuerpo humano

Autor: Esther Hilinger Pelegrín

Director: Oscar López Lapeña

Data: 19 de septiembre de 2008

Resum

Este documento presenta un diseño de generador termoeléctrico para el aprovechamiento de la energía térmica del cuerpo humano. El sistema se compone de tres etapas: cuerpo humano, célula Peltier y un circuito acondicionador de señal.

Los resultados de los ensayos de caracterización de cada una de las etapas se encuentran detallados en la memoria, así como las conclusiones a las que se llega del estudio de las pruebas realizadas. Los componentes que forman parte del diseño final están seleccionados en base a los resultados de dichos ensayos.

También se presenta una caracterización del sistema completo donde se indica la energía total que podemos obtener con nuestro diseño. De esta forma se puede conocer qué sistemas se pueden alimentar utilizando el generador termoeléctrico diseñado.

Title: Thermoelectric converter for using the heat dissipated by the human body.

Author: Esther Hilinger Pelegrín.

Director: Oscar López Lapeña.

Date: September, 19th 2008

Overview

This document contains the design and development of a thermoelectric generator based on human body energy harvesting. The system is composed of 3 parts: the human body, a Peltier cell and a energy conditioning circuit.

The results and the conclusions of the evaluating tests for the different parts of the design are also shown on this document. The selection of the final components used in the system is based on the tests results.

This document also describes the characteristics of the complete system. With these results we can have an idea of the amount of energy that we can obtain with the thermoelectrical generator and, therefore, the electronic devices that we are able to supply with this system.

Índice

1. Introducción	1
2. Bases teóricas	3
2.1. Modelo térmico del cuerpo humano.....	3
2.2. Célula Peltier.....	5
2.3. Circuito acondicionador de eergía	7
3. Circuito de arranque de muy baja tensión	15
3.1. Bomba de carga Seiko S-882Z	15
3.1.1. Funcionamiento	15
3.1.2. Análisis de las condiciones de diseño de la bomba de carga.....	16
4. Convertidor Step up DC/DC	28
4.1. Modelos y caracterización.....	28
4.1.1. MAX757	28
4.1.2. TPS61200.....	30
4.1.3. S- 8353	32
5. Célula Peltier	35
5.1. Criterios de selección	35
5.2. Disponibilidad en el mercado	36
5.3. Selección de soporte físico para la conexión térmica del cuerpo humano.....	37
5.4. Caracterización eléctrica del sistema.	38
6. Diseño del sistema de captación de energía.....	43
6.1. Selección de componentes	43
6.2. Caracterización del sistema de acondicionamiento de energía.....	44
6.3. Resultados obtenidos con la célula Peltier	46
7. Conclusiones	48
8. Bibliografía	49

1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo es la conversión de la energía térmica generada por el cuerpo humano en energía eléctrica capaz de alimentar un circuito electrónico. Este tipo de fuente de alimentación resultaría altamente útil en dispositivos móviles o en dispositivos que necesiten una batería portátil para poder funcionar.

El diseño del sistema de captación energético está basado en tres etapas principales:

- Cuerpo humano.
- Célula Peltier.
- Acondicionador de energía.

La primera de las tres etapas representa la fuente de alimentación del sistema: el cuerpo humano. Esta memoria incluye un apartado donde se explican sus características térmicas y modelado.

La segunda parte es la interficie capaz de transformar el flujo de calor del cuerpo hacia el ambiente en energía eléctrica. Para tal fin se utilizará el efecto Seebeck de las células Peltier comerciales. Debido al pequeño diferencial de temperatura entre el ambiente y el cuerpo humano, la tensión obtenida de las células Peltier será de unos pocos centenares de mili voltios y por lo tanto, será insuficiente para alimentar directamente un circuito electrónico. Consecuentemente, será necesario diseñar un circuito acondicionador de energía que eleve estos valores de tensión.

Se estudiarán dos tipos de circuitos acondicionadores de energía, bomba de carga y convertidor conmutado, los cuales adaptarán las tensiones obtenidas de la salida de la célula Peltier y las elevaran de forma que obtengamos tensiones típicas de alimentación de circuitos electrónicos.

El diagrama de bloques que representa las diferentes etapas del diseño es el siguiente:

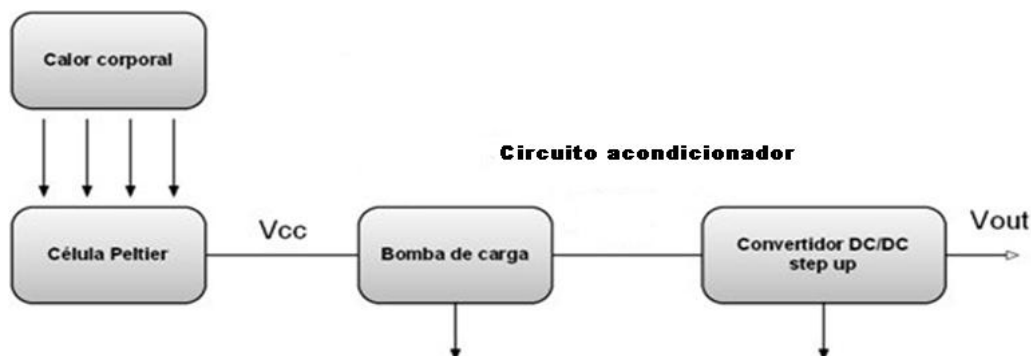


Figura 1.- Diagrama general del convertidor termoelectrico

Una vez presentadas las tres etapas en las que se basará el trabajo, se detalla la distribución de la información por capítulos:

En el capítulo II se describen a grandes rasgos las bases de funcionamiento termoelectrico y características de las diferentes etapas que forman el sistema.

El capítulo III está dedicado a la caracterización y funcionamiento de la bomba de carga escogida para este trabajo.

El siguiente capítulo habla de las características de los diferentes convertidores conmutados utilizados para elevar la tensión obtenida de la bomba de carga.

Los módulos termoelectricos, también llamados células Peltier, son el tema principal del capítulo V. Se detalla el proceso de selección que se llevó a cabo, el diseño del soporte físico adecuado y la caracterización eléctrica del sistema.

En el capítulo VI se determinan los componentes que se utilizan en el diseño final y se muestran los resultados experimentales que lo caracterizan.

Finalmente, en el capítulo VII se exponen las conclusiones a las que se ha llegado después de la caracterización individual de cada componente y la caracterización final del sistema completo.

2. Bases teóricas

2.1. Modelo térmico del cuerpo humano

El cuerpo humano representa la fuente de energía térmica que se propone utilizar para alimentar los circuitos electrónicos. Su comportamiento no corresponde al de un cuerpo inerte, sino que sus características térmicas varían según las condiciones ambientales y su estado fisiológico.

Los sistemas que tiene el organismo para regular la temperatura influyen en gran medida en el calor que podamos aprovechar para nuestra aplicación. Los principales sistemas de regulación son los siguientes:

- Circulación sanguínea
- Transpiración
- Termogénesis¹

El nivel de potencia eléctrica obtenida del módulo termoelectrico dependerá de la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el ambiente. En la siguiente figura se detalla un mapa térmico del cuerpo:

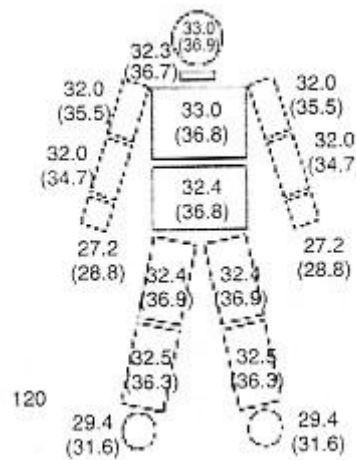


Figura 2.- Mapa térmico del cuerpo humano. Los valores entre paréntesis corresponden al interior de cada órgano que representa y los demás valores corresponden a la temperatura en la superficie de la piel. (Véase [2])

Se observa que la zona donde se obtiene una temperatura mayor es la cabeza. Esto es debido a que obviamente es la zona que necesita más bombeo de sangre. La temperatura en tronco y extremidades es similar y disminuye de forma apreciable en pies y manos.

Con todo esto, se puede decir que la mejor zona para captar el calor es la cabeza, aunque no resulta la más práctica. Una vez valoradas cada una de las zonas por su temperatura y capacidad de acoplamiento al sistema de

¹ Calor corporal que se genera durante las funciones fisiológicas propias del organismo.

captación, se ha elegido la muñeca para realizar las pruebas de nuestro sistema. Obsérvese también que su capa de grasa y densidad muscular son menores y por tanto, presenta menor resistencia térmica que el resto del organismo. Además, la piel en esta zona se encuentra a muy pocos centímetros de las venas, captando gran parte del calor creado por el flujo sanguíneo.

La transferencia de calor no depende únicamente del diferencial de temperaturas sino que también viene determinado por la resistencia térmica entre el cuerpo y la piel. Esta resistencia depende en gran medida de la posición de la mano, el área de apoyo y la temperatura ambiente. Sin entrar en detalles, podemos decir que si la temperatura ambiente baja bruscamente, la resistencia que presenta la parte del cuerpo en cuestión aumenta considerablemente. Lo contrario pasa cuando la temperatura aumenta, la resistencia corporal disminuye. Una muestra de este hecho se describe en [1], donde se asegura que la resistencia térmica en las manos aumenta 7.5 veces cuando la temperatura desciende de 32°C a 22°C.

Además, también tenemos que considerar las resistencias que presentan el módulo termoelectrico y el aire. En la figura 3 se representa el sistema como una cadena de resistencias conectadas en serie:

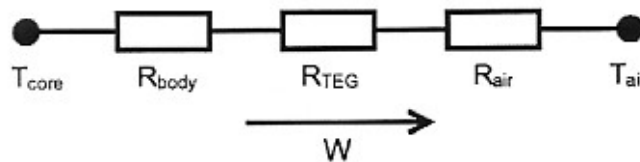


Figura 3.- Flujo de calor del cuerpo al ambiente (Véase [1])

La resistencia térmica en la muñeca (R_{body}) obtenida en [1] oscila entre 90 cm² K/W y 930 cm² K/W, así que consideraremos un valor medio de 400 cm² K/W. Por otra parte, la resistencia térmica del módulo termoelectrico se calcula teniendo en cuenta su geometría y la conductividad térmica de BiTe². Normalmente los valores de resistencia térmica en los módulos comerciales (R_{TEG}) es de unos 50 cm² K/W aproximadamente.

La resistencia térmica entre el aire y el módulo termoelectrico (R_{air}) representa el mayor obstáculo para la disipación de calor. Considerando los mecanismos de radiación y conducción podemos esperar unos valores en el entorno de 1030 cm² K/W.

Los valores anteriormente detallados sobre las resistencias térmicas y temperaturas nos permiten calcular el flujo de calor esperado de una célula Peltier acoplada entre la muñeca y un radiador de las mismas dimensiones. Así por ejemplo, considerando una temperatura en la muñeca de 34.7°C y una temperatura ambiente de 25°C, se obtiene un flujo de calor de 6.5 mW/cm² y una diferencia de temperaturas en la célula Peltier de 0.32°C

² Bismuto Telurio.

2.2. Célula Peltier

La célula Peltier se define como un módulo termoeléctrico que transforma la energía térmica en energía eléctrica. Así pues, la función que realizará en nuestro sistema es la de transformar el calor que pueda captar de nuestro organismo y convertirlo en energía eléctrica para su aprovechamiento.

Los principios de funcionamiento de los módulos termoeléctricos fueron descubiertos a principios del siglo XIX. En 1821, Thomas Seebeck descubrió accidentalmente que dos conductores de tipos diferentes y a temperaturas diferentes crean una fuerza electromotriz o tensión. Más tarde, en 1834, Jean Peltier descubrió que se produce un efecto de calor o enfriamiento cuando una corriente eléctrica circula a través de dos conductores de diferente tipo.

Gracias a estos descubrimientos y con la introducción de los materiales semiconductores a finales de los años 50, se han ido desarrollando los módulos termoeléctricos. En la figura 4 se aprecian las diferentes partes de la que está formada una célula Peltier. Está compuesta por un número de elementos semiconductores de los tipos p y n, dispuestos sobre una superficie cerámica.

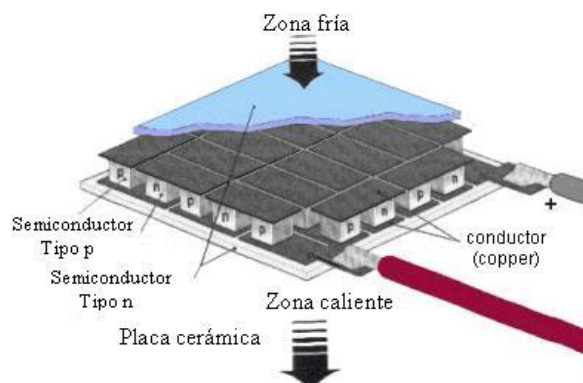


Figura 4.- Partes que forman un módulo termoeléctrico

Para entender mejor el funcionamiento de una célula Peltier debemos definir su modelo termoeléctrico y determinar la relación existente entre los parámetros térmicos y eléctricos.

En la siguiente figura se representa uno de los termopares que componen una célula Peltier:

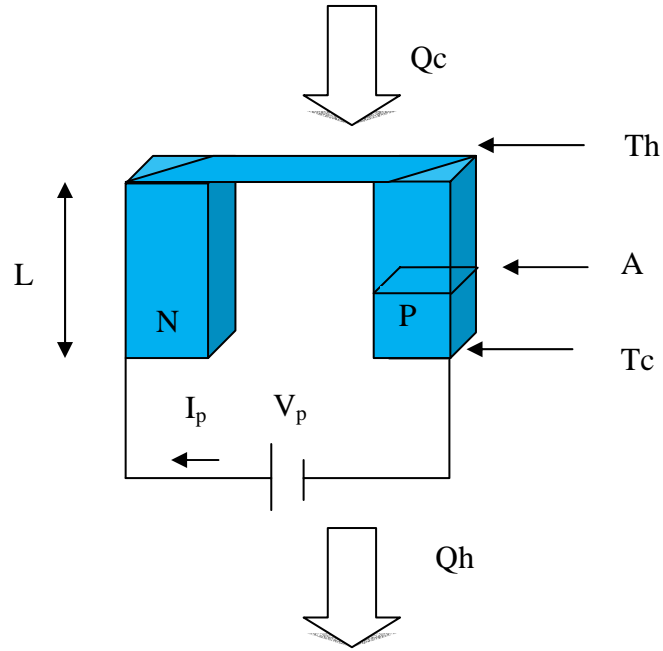


Figura 5.- Termopar de una célula Peltier

Los parámetros y variables físicas que definen este sistema son los siguientes:

- I_p : Corriente eléctrica.
- T_h : Temperatura en la placa caliente.
- T_c : Temperatura en la placa fría.
- α : Coeficiente Seebeck.
- R_p : Resistencia eléctrica.
- K_p : Conductancia térmica.
- V_a : Tensión Seebeck generada.
- C_c y C_h : Capacidades caloríficas de las zonas p y n.

La parte superior del modelo termoeléctrico de la Figura 5 corresponde a la parte térmica del módulo y la parte inferior representa la parte eléctrica.

La expresión de la cantidad de calor absorbido por la placa caliente es:

$$Q_h = \alpha I_p T_h - \frac{1}{2} I_p^2 R_p - K_p (T_h - T_c) \quad (2.1)$$

Y la cantidad de calor que se disipa por la placa fría es:

$$Q_c = \alpha I_p T_c - \frac{1}{2} I_p^2 R_p - K_p (T_h - T_c) \quad (2.2)$$

La forma como se relacionan la parte térmica y eléctrica del modelo se ve claramente en la Figura 5. La diferencia de temperatura $T_h - T_c$ crea una tensión llamada tensión Seebeck cuya expresión es la siguiente:

$$V_a = \alpha (T_h - T_c) \quad (2.3)$$

Si consideramos unas condiciones de diferencia de temperatura constante entre placas de la célula Peltier, se obtiene una relación lineal entre las variables eléctricas y térmicas del módulo termoelectrico:

$$V_p = V_\alpha + I_p R_p \quad (2.4)$$

2.3. Circuito acondicionador de energía

Los niveles de tensión de salida esperados para el módulo termoelectrico están por debajo de los 400 mV. No obstante, las tecnologías convencionales de implementación de circuitos integrados permiten funcionar a partir de tensiones de alimentación de 1V. Consecuentemente, resulta necesario un circuito elevador de tensión que sea capaz de elevar este pequeño voltaje con el fin de alcanzar los niveles necesarios.

Las características principales que deben tener los circuitos acondicionadores para nuestra aplicación son las siguientes:

- Capacidad de funcionamiento a tensiones muy bajas de entrada.
- Capacidad de elevar la tensión de salida por encima de 1 voltio.
- Consumo de corriente de entrada pequeño.
- Capacidad de funcionamiento con resistencia equivalente de la fuente de entrada grande.

Los circuitos acondicionadores que estudiaremos son las bombas de carga y los convertidores conmutados.

Una bomba de carga consiste en una estructura formada por condensadores e interruptores. La acción sobre los interruptores determina la conexión de los condensadores en serie o paralelo de tal forma que se obtienen finalmente tensiones de carga superiores a la fuente de entrada.

Los modelos de bomba de carga más conocidas son el multiplicador de tensión Cockcroft & Walton y la bomba de carga Dickson, véase figura 6.

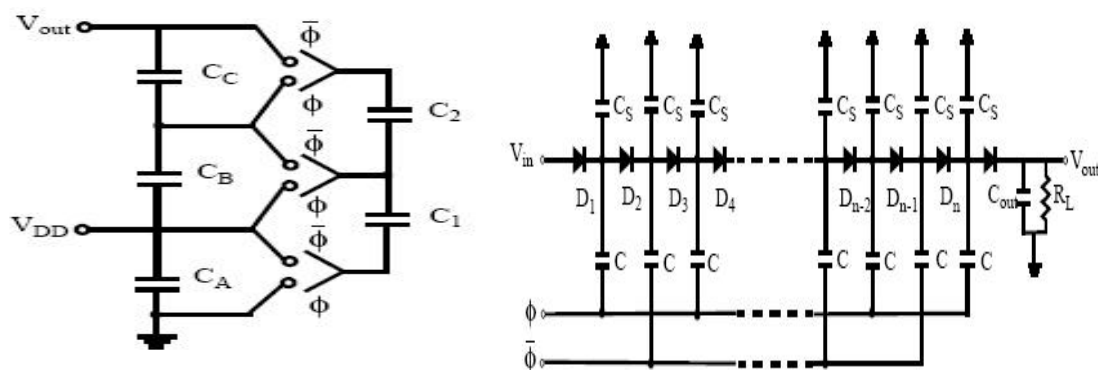


Figura 6.-Multiplicador de tensión Cockcroft & Walton y bomba de carga Dickson

El modelo Cockcroft & Walton consiste en una serie de condensadores conectados a través de interruptores. En cada ciclo de reloj se va transfiriendo la carga de un condensador a otro, hasta que a la salida se obtiene una tensión mayor proporcional al número de etapas de condensadores. Es decir, en el caso de la Figura 6, se obtendrá una tensión 3 veces mayor a la de entrada.

El modelo Dickson es similar al anterior pero más eficiente. Su funcionamiento se basa en el circuito de la Figura 6. La carga se bombea a través de la cadena de diodos a medida que los condensadores se van cargando y descargando en cada ciclo de reloj. Este proceso se repetirá tantas veces como etapas existan, por lo tanto, la tensión de salida dependerá del número de etapas.

Para analizar si este tipo de elevadores serían apropiados para este proyecto, analizamos su rendimiento en la transferencia de energía a la carga. Este análisis parte de un modelo básico de transferencia de energía entre los condensadores que formarían parte de la bomba de carga.

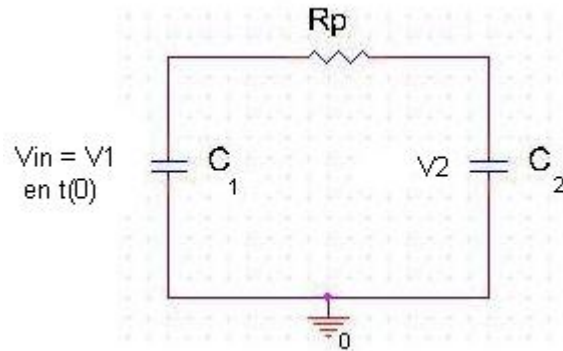


Figura 7.- Esquema de transferencia de energía entre condensadores

R_p corresponde a la resistencia de pérdidas del circuito y su valor viene fundamentalmente marcado por la resistencia de conducción de los transistores. En las condiciones iniciales de arranque del sistema, los niveles de tensión de puerta en los transistores serían iguales a los obtenidos de la célula Peltier y por tanto, esta resistencia sería muy grande. No obstante, el estudio realizado indica que la cantidad de energía transferida a C_2 no depende de R_p y únicamente influye en la velocidad de transferencia de energía.

$$\tau = \frac{1}{R_p \cdot C} \Rightarrow \begin{array}{l} R_p \uparrow \uparrow \Rightarrow \tau \downarrow \downarrow \\ R_p \downarrow \downarrow \Rightarrow \tau \uparrow \uparrow \end{array} \quad (2.5)$$

Donde C es la capacidad equivalente entre C_1 y C_2 , $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$.

El rendimiento del circuito se puede calcular de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{E_2(\infty)}{E_1(0) - E_1(\infty)} = \frac{C_2}{C_1} \frac{\left(\frac{C_1}{C_1 + C_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2}\right)^2} \quad (2.6)$$

Donde $E_2(\alpha)$ es la energía a salida del sistema en el instante final y $E_1(0) - E_1(\alpha)$ es la energía que se transfiere de C_1 a C_2 . La expresión (2.6) se puede simplificar de tal forma que el rendimiento se puede expresar como:

$$\eta = \frac{1}{2 + \frac{C_2}{C_1}} \quad (2.7)$$

Con lo que podemos deducir que el rendimiento será mayor cuanto más pequeña sea la capacidad C_2 y siempre estará por debajo del 50%.

De esta forma se demuestra que la resistencia de pérdidas no influye en la cantidad de energía que obtenemos a la salida. Consecuentemente, serán idóneos para operar a tensiones muy bajas de entrada sin que se produzcan grandes caídas de tensión en cuanto al rendimiento causado a la resistencia de conducción de los transistores. No obstante, los rendimientos esperados en condiciones normales de funcionamiento (tensiones por encima de un voltio) son mucho menores que los convertidores conmutados.

Por otra parte, la otra alternativa en el diseño de circuitos acondicionadores de energía la constituyen los convertidores conmutados. Existen tres tipos de convertidores conmutados para alimentar una carga a tensión continua a partir de otra fuente de tensión continua.

- Step up/down: eleva o disminuye la tensión continúa de entrada a su salida.
- Step up: eleva la tensión continua de entrada a su salida.
- Step down: disminuye la tensión de entrada continua a su salida.

En este proyecto se utilizará un convertidor Step up, es decir, del tipo elevador. Una de las estructuras más típicas es la del convertidor boost. En su diseño suele incorporar cuatro elementos básicos: semiconductores, diodos, condensadores e inductores.

El funcionamiento básico de un convertidor boost responde al esquema de la siguiente figura:

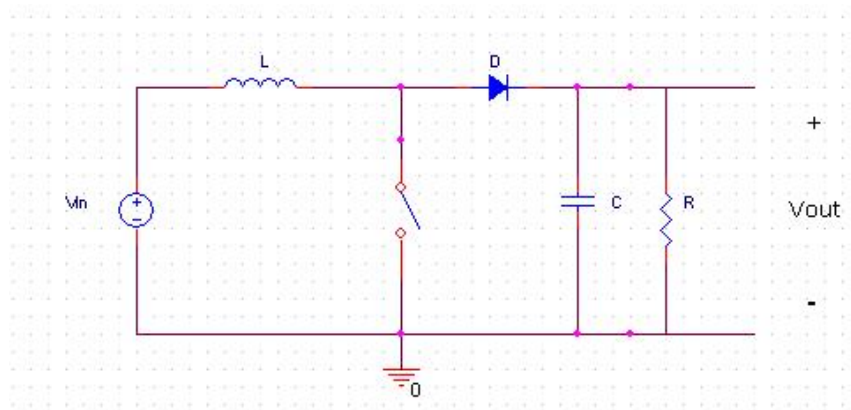


Figura 8.- Esquema básico de un convertidor boost

La transferencia de energía de la fuente a la carga se realiza mediante dos estados determinados por la situación de bloqueo o conducción del interruptor. Cuando el interruptor está en conducción, la fuente transfiere la energía a la bobina aumentando su corriente. Posteriormente, cuando el interruptor pasa a estado de bloqueo, la energía almacenada en la bobina se transfiere a la carga.

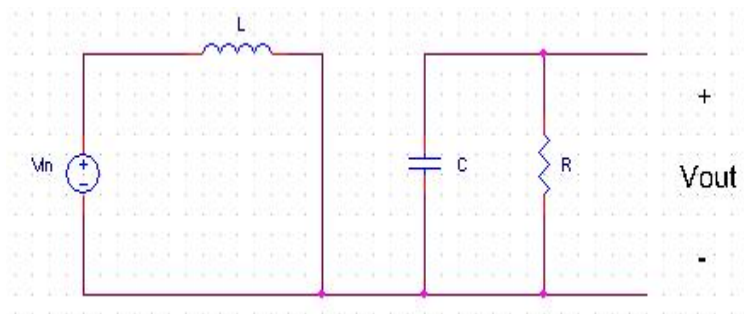


Figura 9.- Esquema equivalente durante estado de conducción

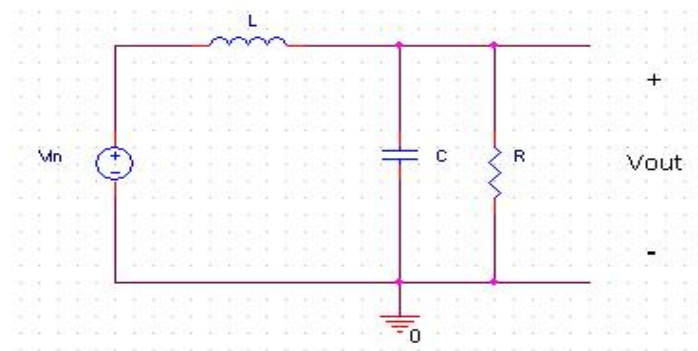


Figura 10.- Esquema equivalente durante estado de bloqueo

Considerando un periodo de conmutación constante, que llamaremos T , y un tiempo de conducción DT , siendo D el ciclo de conducción del transistor, se puede deducir que en régimen estacionario la relación de conversión viene dada por la expresión:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.8)$$

Nótese en esta expresión que la tensión en la carga será superior a la de entrada, ya que el ciclo de conducción D tiene un valor positivo e inferior a uno.

Al igual que se hizo anteriormente con las bombas de carga, también se puede analizar su idoneidad en el diseño analizando el rendimiento del sistema. En este caso, la transferencia de energía se realiza de condensador a bobina o viceversa, como se puede apreciar en el siguiente esquema eléctrico:

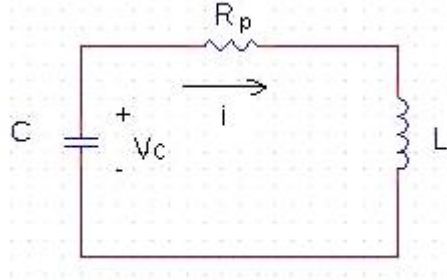


Figura 11.- Esquema de transferencia de energía entre condensador y bobina.

En este caso, se demostrará que la resistencia R_p sí que influye en el rendimiento de la transferencia de energía del condensador a la carga

En el análisis del rendimiento consideramos que el condensador está inicialmente cargado a una tensión V_c y la bobina no tiene energía.

$$i(0) = 0 \quad (2.9)$$

$$V_c(0) = V_c \quad (2.10)$$

La dinámica de las variables de estado del sistema de la figura viene dado por las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$L \frac{\delta i}{\delta t} = V_c - R_p i \quad (2.11)$$

$$C \frac{\delta V_c}{\delta t} = -i \quad (2.12)$$

Si resolvemos las ecuaciones diferenciales anteriores llegamos a la solución final de $i(t)$:

$$i(t) = \frac{V_c}{L\omega} e^{-\alpha t} \text{sen}(\omega t) \quad (2.13)$$

Valorando el punto de mayor energía en la bobina, se deduce que la relación entre la energía máxima transferida a la bobina y la inicial en el condensador depende de la resistencia de pérdidas según la siguiente relación:

$$\eta = e^{-\sqrt{\frac{1-x}{x}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}\right)} \quad (2.14)$$

Donde

$$x = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{R_p}{\sqrt{L/C}} \right)^2 \quad (2.15)$$

De esta forma concluimos que el rendimiento del circuito RLC depende del factor $\frac{R_p}{\sqrt{L/C}}$. Lo ideal sería que R_p fuera cero pero en la práctica esto no

ocurre. Por tal de disminuir la R_p tendríamos que elevar el valor de L/C , lo que conduciría a una bobina mayor y mayor resistencia de pérdidas. Debido a la influencia de la resistencia de pérdidas en el rendimiento, se deduce que este tipo de convertidores no son apropiados durante las condiciones de arranque del sistema, cuando las tensiones de puerta de los transistores son pequeñas.

En la siguiente gráfica se muestra la relación del rendimiento respecto el factor $\frac{R_p}{\sqrt{L/C}}$.

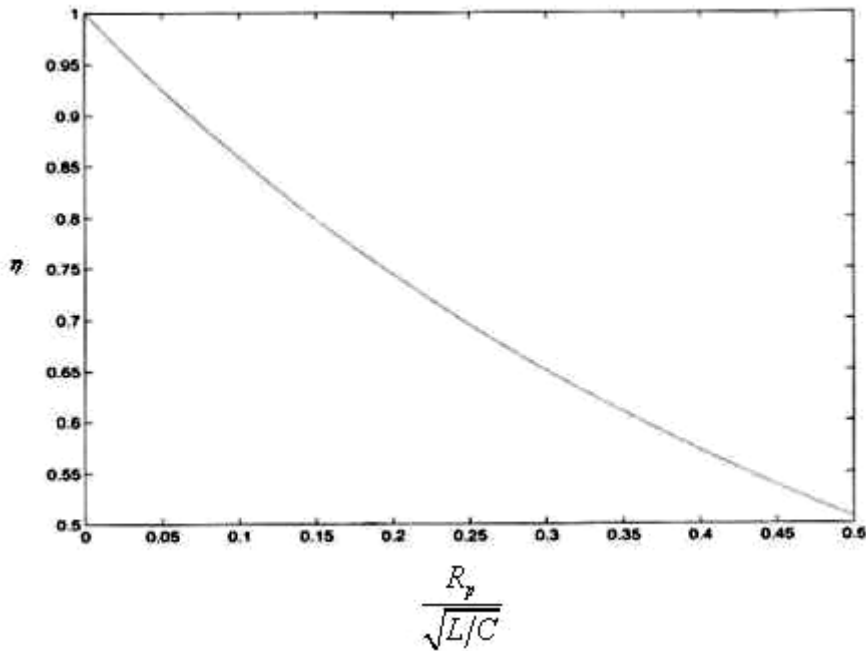


Figura 12.- Curva de rendimiento respecto al factor $\frac{R_p}{\sqrt{L/C}}$

Una vez presentadas las dos alternativas en el diseño de elevadores de tensión debemos determinar cuál de ellos podría tener un mejor comportamiento en nuestro sistema.

Existen varias combinaciones posibles:

- a) Utilizar únicamente el convertidor conmutado.
- b) Utilizar únicamente la bomba de carga.
- c) Utilizar la bomba de carga con el convertidor conmutado conectado a su salida.

La opción a) a primera vista podría resultar apropiada ya que, los convertidores conmutados son capaces de regular a tensiones altas la salida y cuentan con un alto rendimiento de funcionamiento. El inconveniente principal que descarta su idoneidad se debe a su incapacidad de funcionamiento a partir de las tensiones que proporciona la célula Peltier. Además se suma el problema analizado anteriormente en cuanto a rendimiento se refiere y la influencia de la resistencia de pérdidas.

Únicamente existe un modelo de convertidor que puede trabajar a 0.3V de entrada, el cual se presenta en esta memoria. Como se verá en el correspondiente apartado, el consumo de corriente de este convertidor es tan elevado que no permite trabajar con resistencias de entrada muy elevadas. Esta es una desventaja de este tipo de convertidores conmutados. No obstante, se podrían diseñar otros convertidores conmutados que no necesitaran tanto consumo de corriente de entrada.

En cuanto a la opción b), las bombas de carga pueden trabajar a tensiones menores con lo que serían capaces de elevar la tensión de salida del módulo termoelectrónico. El inconveniente en este caso es que las bombas de carga son muy ineficientes, con lo que la pérdida de energía durante su funcionamiento es muy elevada.

Todo esto nos hace pensar que la mejor opción es la c). La bomba de carga se utilizará para elevar la tensión procedente de la célula Peltier hasta 2V, suficientes como para poder arrancar el convertidor elevador. En nuestro caso, los convertidores que utilizaremos podrán regular la tensión hasta 3V o 5V, con lo que podremos alimentar circuitos electrónicos. De esta forma se limita el tiempo de funcionamiento de la bomba de carga aumentando así el rendimiento total del circuito.

La siguiente figura representa la opción c) para el diseño del generador termoelectrónico. Una vez el circuito de arranque carga el condensador C, el interruptor S se cierra y deja que la carga circule hacia el otro condensador de forma que se realiza la transferencia de energía. Cuando ésta es suficiente para que el convertidor conmutado arranque se regula la tensión de salida. Una vez el convertidor se encuentra en funcionamiento se realimenta él mismo con la tensión de salida, que a través del diodo vuelve a cargar el condensador C.

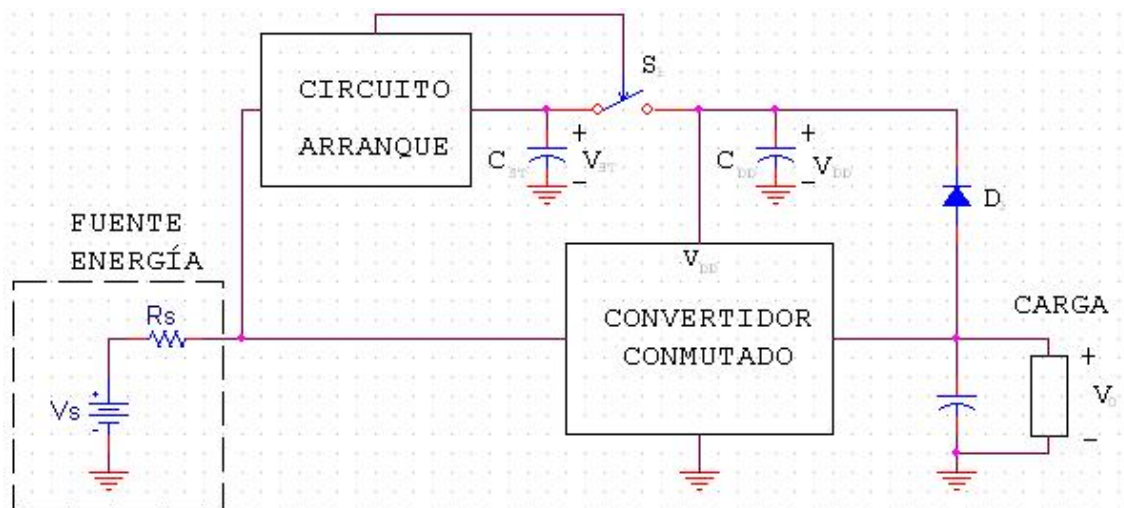


Figura 13.- Esquema del generador termoeléctrico

3. Circuito de arranque de muy baja tensión

3.1. Bomba de carga Seiko S-882Z

3.1.1. Funcionamiento

La bomba de carga escogida para la realización de este proyecto pertenece al fabricante Seiko Instruments. Esta bomba de carga está diseñada especialmente para arrancar un convertidor conmutado. Su característica fundamental es su capacidad de operar a tensiones muy bajas, alrededor de los 0.3V, por lo que nos resulta ideal para nuestra aplicación ya que las tensiones que obtendremos del módulo termoelectrico son muy reducidas.

El esquema típico de conexión es el que se muestra en la figura 14. El condensador C_{cpout} corresponde al condensador de arranque para el convertidor conmutado y su valor se determinará más adelante.

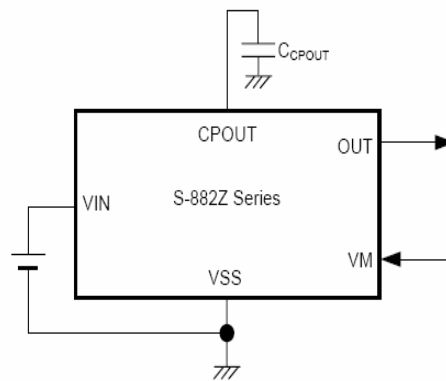


Figura 14.- Esquema típico de conexión

Para entender mejor el funcionamiento de esta bomba de carga es conveniente estudiar su esquema interno (Figura 15).

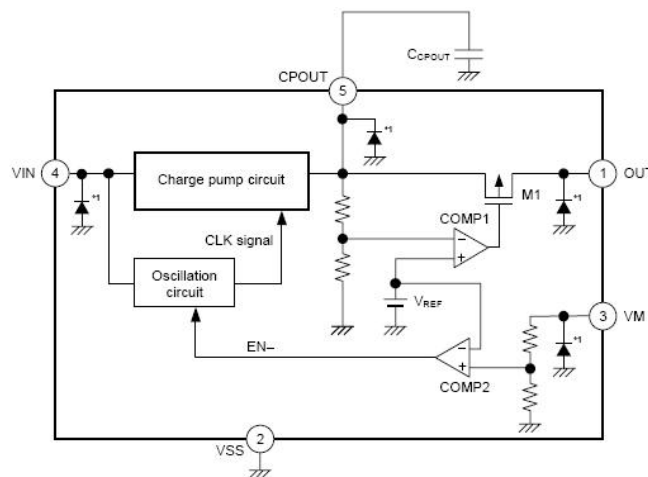


Figura 15.- Esquema interno de la bomba de carga

Cuando a la entrada de la bomba de carga se le aplican tensiones de 0.3V a 3V, el condensador C_{cpout} se empieza a cargar. Al mismo tiempo, el transistor M1 se encuentra abierto.

Cuando el condensador C_{cpout} alcanza una tensión de 2V el interruptor M1 se cierra, ya que la señal de salida del comparador COMP1 cambia de nivel alto a nivel bajo. De esta forma el condensador se empieza a descargar y la energía sale por el pin 1 de la bomba de carga (Pin de salida).

En el momento que el condensador se ha descargado y llega a la tensión de cese de descarga (en nuestro caso el valor típico proporcionado por el datasheet es de aproximadamente 1.4V), el transistor M1 se vuelve a abrir y la descarga se para. En ese momento empieza de nuevo la carga del condensador C_{cpout} hasta alcanzar los 2V.

El pin VM sirve como monitorización de la salida cuando se conecta un convertidor conmutado a la bomba de carga. Cuando se detecta un determinado nivel de tensión en este pin, en nuestro caso 2.1V, la bomba de carga se apaga y el convertidor conmutado sigue funcionando.

3.1.2. Análisis de las condiciones de diseño de la bomba de carga

En este apartado se describen tres condiciones de diseño que deben cumplir los elementos conectados a la bomba de carga para su correcto funcionamiento.

En primer lugar la capacidad de C_{cpout} debe de ser diez veces superior a C (3.1). En caso contrario, el condensador C_{cpout} no es capaz de proporcionar suficiente energía al condensador C como para cargarse, como se aprecia en la figura 16.

$$C_{cpout} > 10 \cdot C \quad (3.1)$$

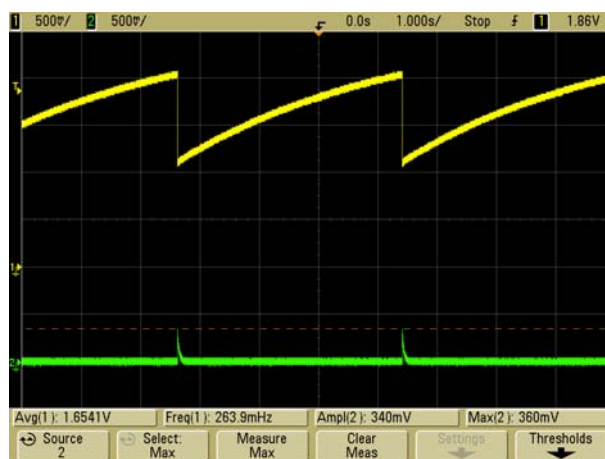


Figura 16.- Tensión V_{cpout} y V_{out} cuando $C > C_{cpout}$. La traza amarilla representa la tensión V_{cpout} y la verde la tensión V_{out} .

La siguiente condición impone que la energía transferida a C sea mayor que la necesaria para alimentar el convertidor conmutado hasta que la tensión de salida se recargue por encima de la tensión mínima de alimentación del convertidor.

$$\left(\frac{V_{cpout} \cdot C_{pout}}{C_{pout} + C} - 0.1 \cdot I - V_{DDL} \right) \times (C_{pout} + C) > 2ts \cdot I \quad (3.2)$$

Donde: C: Condensador conectado a la alimentación del convertidor.
I: Corriente de consumo del convertidor.
 V_{DDL} : Tensión mínima de alimentación del convertidor.
ts: Tiempo de arranque del convertidor.

Por último, la bomba de carga no puede trabajar con convertidores cuya mínima tensión de operación esté por debajo de la tensión de inicio de descarga de la bomba de carga.

$$V_{cpout} > V_{DDL} + 0.2V \quad (3.3)$$

Considerando que V_{cpout} en el instante de descarga es de dos voltios, se deduce la siguiente condición para la tensión mínima de alimentación del convertidor conmutado.

$$V_{DDL} < 1.8V \quad (3.4)$$

La siguiente imagen muestra la carga y descarga del condensador C_{cpout} y la salida de la bomba de carga cuando C_{cpout} es diez veces mayor que el condensador de salida. Observamos cómo en este caso la salida que se obtiene es mayor que en la figura 16, lo que permite un buen funcionamiento de la bomba de carga.



Figura 17.- Tension C_{cpout} y V_{out} cuando C es inferior a C_{out} . La señal amarilla corresponde a V_{cpout} y la verde a la salida de la bomba de carga con $V_{in} = 0.380 V$

3.1.2.1. *Medidas y caracterización de la bomba de carga*

Durante el proceso de caracterización se ha utilizado el esquema de la figura 18, donde se ha conectado el pin VM a masa y se ha utilizado una capacidad C_{cpout} de 10 μF .

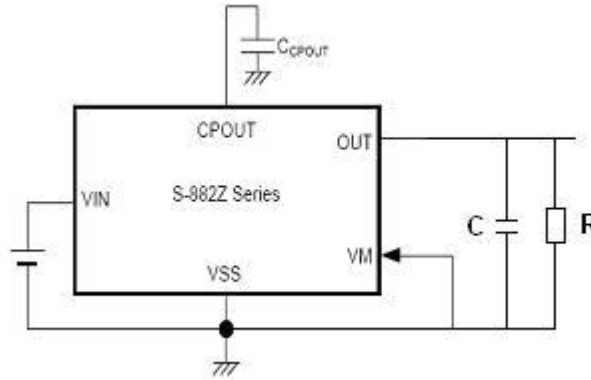


Figura 18.- Bomba de carga

En la figura 19 se observan los resultados experimentales utilizando una fuente de tensión de entrada de 0.317V. Nótese que la tensión en C_{cpout} va aumentando hasta que alcanza la tensión de disparo. Entonces transfiere la energía al condensador C aumentando este último su tensión.



Figura 19.- La señal amarilla corresponde a V_{cpout} y la señal verde a la salida de la bomba de carga V_{out} cuando $V_{in} = 0.317 V$.

Se observa que la carga y descarga del condensador C_{cpout} va de los 0V a 2V aproximadamente, cosa que cabía esperar ya que el modelo de bomba de carga utilizado tiene una tensión de comienzo de descarga de 2V.

En la caracterización de la bomba de carga se han realizado los siguientes ensayos:

- Medida del rendimiento energético.
- Medida de los transitorios de la corriente consumida.
- Estudio de las corrientes de entrada de la bomba de carga.

- Condiciones mínimas de la resistencia de Thévenin de la fuente de entrada.

3.1.2.2. Rendimiento de la bomba de carga

A pesar de que típicamente el rendimiento de las bombas de carga suele ser pequeño, se ha creído conveniente medirlo con objeto de descartar la opción b) expuesta en el capítulo II.

El procedimiento de medida se ha basado en la relación entre el incremento de energía que sufre C respecto a la energía suministrada por la fuente durante la carga de C_{cpout} .

Se han calculado estos valores energéticos mediante las siguientes relaciones:

$$E_{in} = \int P_{in} \delta t \quad (3.5)$$

$$E_{out} = \frac{C}{2} (V_{out,final}^2 - V_{out,inicial}^2) \quad (3.6)$$

Relacionando (3.5) y (3.6) llegamos a la expresión del rendimiento:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{C}{2} \frac{\Delta V_{out}}{V_{in} I_{in} \Delta t} \quad (3.7)$$

Donde Δt es el tiempo que tarda el condensador en pasar de 0V a 2V y ΔV_{out} la diferencia entre el valor máximo y mínimo de tensión a la salida.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 3.1 Rendimiento para resistencia de carga $R = 20 \text{ k}\Omega$ con $C_{cpout} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 100 \text{ nF}$

$V_{in} \text{ [V]}$	$I_{in} \text{ [}\mu\text{A]}$	$P_{in} \text{ [}\mu\text{W]}$	$E_{in} \text{ [}\mu\text{W]}$	$V_{out} \text{ [V]}$	$P_{out} \text{ [}\mu\text{W]}$	$E_{out} \text{ [}\mu\text{W]}$	$\eta \text{ [%]}$
0.355	50	17.75	24.67	1.86	172.98	1.72	6.97
0.400	79	31.6	13.79	1.93	186.24	1.86	13.56
0.450	122	54.9	13.83	1.85	171.12	1.71	12.36
0.500	172	86.1	21.84	1.86	171.12	1.71	7.82

Tabla 3.2 Rendimiento para resistencia de carga $R = 100 \text{ k}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 100 \text{ nF}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	49	17.39	18.75	1.84	33.85	1.69	8.99
0.400	81	32.4	14.64	1.86	34.59	1.72	11.74
0.450	120	54	14.79	1.86	34.59	1.72	11.62
0.500	172	86	22.01	1.81	32.76	1.63	7.40

Tabla 3.3 Rendimiento para resistencia de carga $R = 430 \text{ k}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 100 \text{ nF}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	50	17.75	18.46	1.83	7.78	1.67	9.04
0.400	78	31.20	12.97	1.83	7.78	1.67	12.94
0.450	120	54	14.68	1.85	7.95	1.71	11.65
0.500	180	90	21.96	1.85	7.95	1.71	7.78

Tabla 3.4 Rendimiento para resistencia de carga $R = 1 \text{ M}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 100 \text{ nF}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	50	17.75	19.17	1.83	3.34	1.67	8.73
0.400	83	33.20	15.13	1.83	3.34	1.67	11.06
0.450	107	48.15	13.19	1.83	3.34	1.67	12.66
0.500	180	90	13.68	1.9	3.49	1.79	13.15

Tabla 3.5 Rendimiento para resistencia de carga $R = 20 \text{ k}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	50	17.75	156.55	1.71	146.2	14.62	9.33
0.400	83	33.20	117.52	1.66	137.78	13.77	11.72
0.450	126	56.70	107.73	1.70	144.50	14.45	13.41
0.500	180	90	115.20	1.72	147.92	14.79	12.84

Tabla 3.6 Rendimiento para resistencia de carga $R = 100 \text{ k}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	50	17.75	153.71	1.66	27.55	13.77	8.96
0.400	80	32	113.92	1.72	29.58	14.79	12.98
0.450	128	57.6	105.98	1.74	30.27	15.13	14.27
0.500	178	89	124.60	1.74	30.27	15.13	12.14

Tabla 3.7 Rendimiento para resistencia de carga $R = 430 \text{ k}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	50	17.75	157.26	1.74	7.04	15.13	9.62
0.400	84	33.60	110.20	1.72	6.88	14.79	13.42
0.450	126	56.70	115.66	1.78	7.36	15.74	13.61
0.500	173	96.50	107.26	1.72	6.88	13.91	12.96

Tabla 3.8 Rendimiento para resistencia de carga $R = 1 \text{ M}\Omega$ con $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$ y $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	P_{in} [μW]	E_{in} [μW]	V_{out} [V]	P_{out} [μW]	E_{out} [μW]	η [%]
0.355	52	18.46	155.06	1.72	2.95	14.79	9.53
0.400	81	32.4	115.34	1.74	3.02	15.07	13.07
0.450	124	55.8	107.13	1.80	3.24	15.31	14.29
0.500	180	90	117	1.81	3.27	14.06	12.02

Se observa que para cualquier carga conectada a la salida el rendimiento de la bomba de carga se mantiene más o menos constante frente a variaciones de tensión de entrada y para los valores diferentes de condensador.

No obstante, se puede decir que el rendimiento de la bomba de carga es mejor cuando $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$. Esto se muestra con mayor claridad en las siguientes gráficas donde se compara el rendimiento para cada caso.

η (%) [1]: $C_{\text{cpout}} = 1 \text{ }\mu\text{F}$

η (%) [2]: $C_{\text{cpout}} = 10 \text{ }\mu\text{F}$

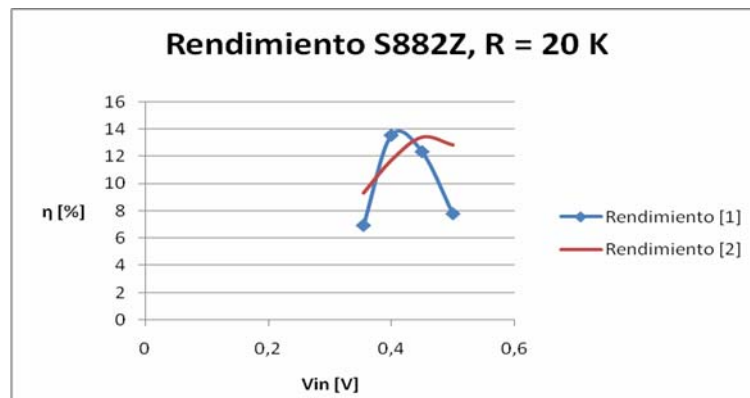


Figura 20.-Rendimiento de la bomba de carga, R = 20 K Ω

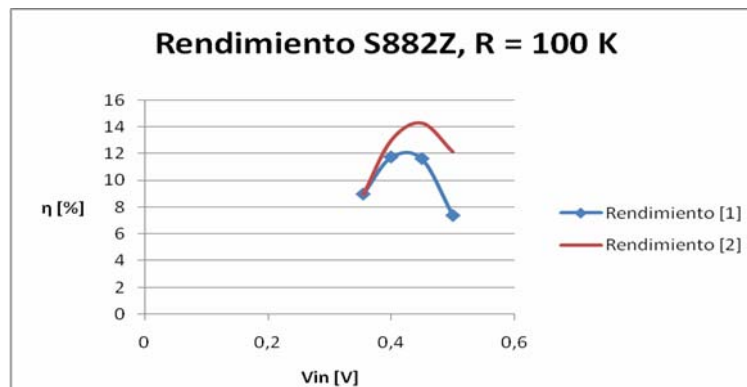


Figura 21.- Rendimiento de la bomba de carga, R = 100 K Ω

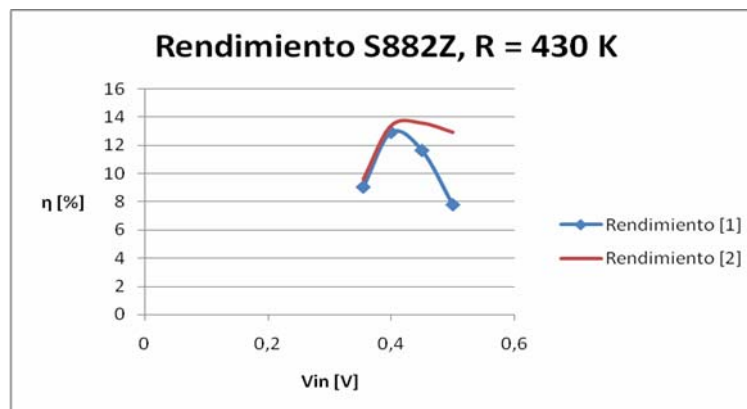


Figura 22.- Rendimiento de la bomba de carga, R = 430 K Ω

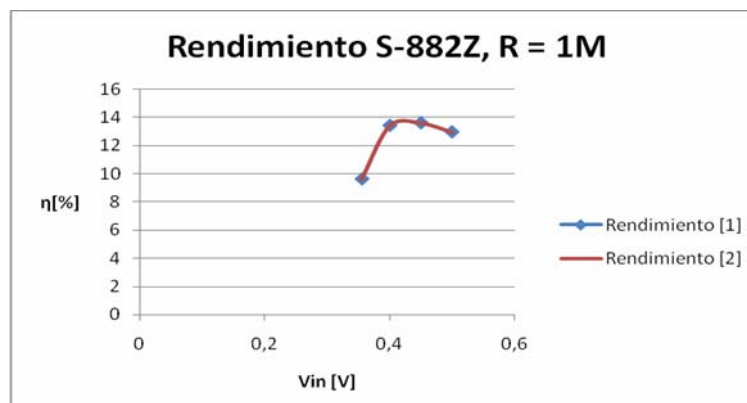


Figura 23.- Rendimiento de la bomba de carga, R = 1 M Ω

También se observa que la resistencia de carga no influye en gran medida sobre el rendimiento obtenido, aunque a medida que ésta aumenta observamos una ligera mejoría del rendimiento. Así pues, en principio la resistencia que ejerza el posible convertidor conmutado que se conecte a la salida de la bomba de carga no supone una restricción a la hora de escoger el modelo.

3.1.2.3. Estudio de las corrientes de entrada de la bomba de carga

La carga rápida de condensadores que se produce en una bomba de carga podría ocasionar pulsos de corriente importantes que conducirían a un mal funcionamiento del sistema. Resulta por tanto interesante para el diseño medir las formas de onda de la corriente consumida.

Debido a que los niveles de corriente que se pretenden medir están fuera del rango de medida de las sondas disponibles en el laboratorio, se ha tenido que diseñar una sencilla sonda adaptada a nuestra aplicación. El circuito de la figura 24 muestra como se han realizado los ensayos.

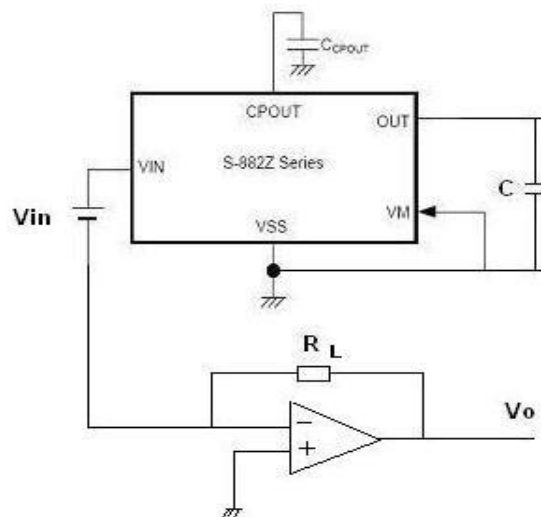


Figura 24.- Sonda para medir la corriente de entrada de la bomba de carga

Así, la tensión de salida V_o nos dará el valor de la corriente y su forma. El valor de cada componente es el siguiente:

$$C_{cpout} = 10 \mu F$$

$$C = 680 nF$$

El valor de R_L varía en función de lo que se quiera observar en el osciloscopio. Por ejemplo, para determinar la tensión de arranque de la bomba de cara se debe utilizar una resistencia menor que para visualizar los demás ciclos de tensión, ya que durante el arranque obtenemos tensiones mayores y el amplificador se satura.

Aplicando una tensión de 450 mV a la entrada lo que se observa en el osciloscopio es lo siguiente:



Figura 25.- Carga de C_{cpout} y tensión de arranque

La señal amarilla representa la carga del condensador C_{cpout} y la verde un pico de tensión de 13.7V correspondiente a la tensión de entrada en la bomba de carga. Con lo que podemos esperar unos picos de intensidad de alrededor de

$$I_{arranque} = \frac{13.7V}{5.1k\Omega} = 2.68mA.$$

En la siguiente imagen se ve con más detalle la forma de tensión en el arranque:

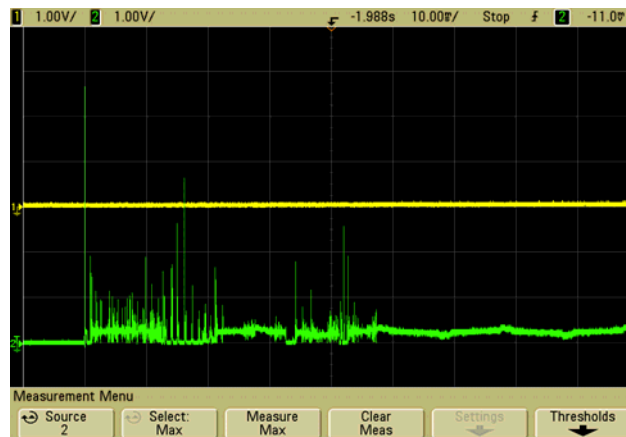


Figura 26.- Tensión durante el arranque de la bomba de carga

Haciendo sucesivas capturas observamos que siempre se repite la misma forma de onda, comprobando de esta forma que no se trata de ruido.

Para visualizar mejor la forma de la corriente durante los demás ciclos ponemos una $R_L = 20\text{ K}\Omega$.

La tensión máxima que obtenemos durante el funcionamiento son aproximadamente unos 3V, con lo que la intensidad máxima que consumirá es de aproximadamente de $I = \frac{V}{R} = \frac{3V}{20k\Omega} = 150\mu A$.

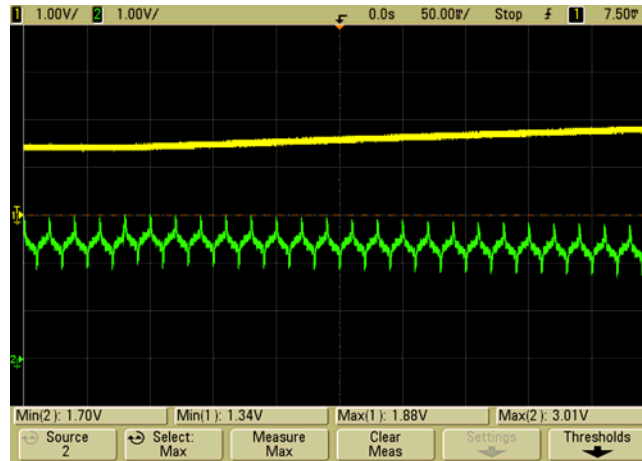


Figura 27.- Forma de la tensión durante el funcionamiento de la bomba de carga.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores de capacidad. Estas pruebas se realizaron con objeto de valorar en qué medida afecta a la corriente de entrada la elección del condensador.

Tabla 3.9 Intensidades de funcionamiento de la bomba de carga

C_{cpout}	C	Intensidad máxima durante los primeros instantes de carga de C_{cpout}	Intensidad máxima después de los instantes iniciales de carga de C_{cpout}
1 μF	100 nF	2.25 mA	147.64 μA
10 μF	1 μF	2.68 mA	150 μA
33 μF	3.3 μF	2.68 mA	168.6 μA

Se observa que pongamos el condensador que pongamos, la intensidad tanto en el arranque como durante el funcionamiento se mantiene constante. Por lo tanto, se deduce que la capacidad del condensador no afecta al nivel de corriente que tengamos a la entrada.

De hecho, cabía esperar estos resultados, ya que en el datasheet de la bomba de carga indica que la corriente consumida durante su funcionamiento es de 100 μA para una entrada de 300 mV (valor típico mínimo).

Además podemos calcular qué cantidad de corriente le llega al condensador C_{cpout} observando la variación en el tiempo de su tensión. Nótese que es

prácticamente independiente del condensador elegido y constante durante la curva de descarga.

Tabla 3.10 Intensidades que circulan en el condensador C_{cpout} durante funcionamiento.

C_{cpout}	I_{Ccpout}
$1\mu F$	$\frac{0.71V}{70ms} \cdot 1\mu F = 10.14\mu A$
$10\mu F$	$\frac{0.72V}{0.6s} \cdot 10\mu F = 12\mu A$
$33\mu F$	$\frac{0.68V}{2.1s} \cdot 33\mu F = 10.6\mu A$

3.1.2.4. Resistencia de entrada de la bomba de carga

Por último, debido a la característica lineal entre la tensión y la corriente de una célula Peltier, se ha creído conveniente determinar cuál es la resistencia Thévenin máxima que permitiría el arranque de la bomba de carga. En este caso el esquema utilizado en el ensayo es el mostrado en la figura 28.

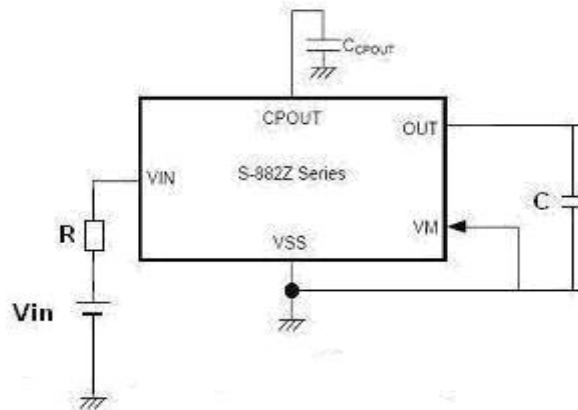


Figura 28.- Bomba de carga con resistencia de entrada.

La tensión mínima a la que puede trabajar la bomba de carga escogida teóricamente es de 300mV. Experimentalmente observamos que para esta tensión de entrada el condensador C_{cpout} se carga a 2V pero no transfiere la energía almacenada hacia la salida. Esto ocurre cuando se aplica 316 mV a la entrada de la bomba de carga. Así pues, tenemos que aplicar tensiones mayores que 316 mV para la realización de la prueba.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para diferentes tensiones y diferentes resistencias de entrada. Esto nos dará una idea de la resistencia máxima que debería tener nuestra célula Peltier para garantizar un buen funcionamiento de la bomba de carga.

Tabla 3.11 Máxima resistencia Thévenin que permitiría el arranque de la bomba de carga.

V_{in}	322 mV	340 mV	400 mV	540 mV	880mV	1.5V	3V
$C_{cpout} = 10\mu F$	430 Ω	2.2 k Ω	4.3 k Ω	10 k Ω	27 k Ω	56 k Ω	120 k Ω
$C_{cpout} = 1\mu F$	240 Ω	2.2 k Ω	4.3 k Ω	10 k Ω	27 k Ω	56 k Ω	120 k Ω

También se ha observado cómo afecta la resistencia Thévenin de la fuente de entrada a la forma de onda de la corriente. En este caso se ha utilizado el esquema de la figura 29.

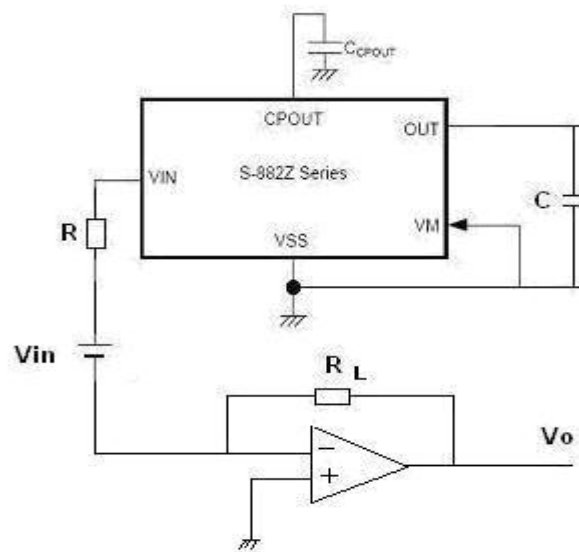


Figura 29.- Circuito utilizado para el cálculo de corrientes con una resistencia de entrada

Tabla 3.12 Corrientes de funcionamiento de la bomba de carga para diferentes resistencias de entrada cuando $C_{pout} = 10\mu F$ y $C = 1\mu F$.

V_{in} [V]	R_{max} [Ω]	I arranque [mA]	I ciclos [μA]
0.340	2200	2.66	60
0.540	10000	2.66	61
1.5	56000	2.66	65

Observamos que la intensidad de arranque es similar a la obtenida sin conectar ninguna resistencia de Thévenin a la entrada. En cambio, la intensidad después del transitorio inicial baja de los 100 μA a los 60 μA para todos los valores de resistencias utilizados en el ensayo, con lo que se puede deducir que se mantendrá siempre alrededor de los mismos valores.

4. Convertidor Step up DC/DC

En este capítulo se describirán las características principales de funcionamiento de los convertidores conmutados escogidos.

Se conectará cada convertidor a la salida de la bomba de carga con el fin de que ésta los arranque y a continuación deje de funcionar, dejando como único elevador de tensión al convertidor conmutado y como única fuente de alimentación al módulo termoelectrico.

Se han intentado escoger modelos de diferentes fabricantes que cumplen los requisitos de diseño comentados en 3.1.2., y de esta forma poder comparar y determinar cuál es el más adecuado para nuestra aplicación.

4.1. Modelos y caracterización

4.1.1. MAX757

El convertidor MAX757 corresponde a un modelo de convertidor elevador perteneciente al fabricante Maxim. Admite tensiones de entrada de 1.1V durante el arranque y de 0.7 V una vez en funcionamiento. Su tensión de salida es programable de 2.7V a 5.5V.

El datasheet del fabricante indica que el convertidor puede arrancar a una tensión de 1.1V como valor típico de entrada. Como vimos en el estudio de la bomba de carga, ésta puede alimentar de 1.8V a 2V, con lo que en principio sería suficiente como para poder arrancar el convertidor.

Además, indica que una vez arrancado el convertidor, la tensión de alimentación puede bajar hasta los 0.7V sin que el convertidor deje de funcionar. Esto puede suponer un inconveniente debido a que la alimentación se realiza a través de la tensión proporcionada por la célula Peltier, con lo cual posiblemente no pueda alcanzar tensiones en circuito abierto de esta magnitud.

El esquema utilizado para realizar las pruebas del convertidor es el siguiente:

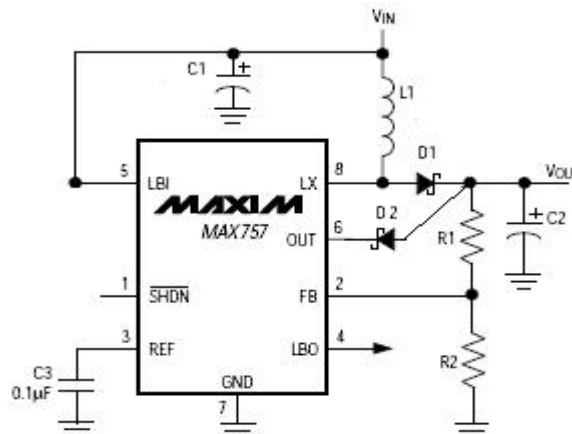


Figura 30.- Esquema de conexión del convertidor

Los valores de los componentes utilizados en el esquema son:

D1, D2: Diodos Schotcky BAT47.

L1 = 22 μ H.

C1 = C2 = 100 μ F.

C3 = 100 nF.

R1 = 300 k Ω

R2 = 100 k Ω .

El valor de los condensadores es el recomendado por el fabricante y el de las resistencias se ha calculado resolviendo la siguiente ecuación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \quad (4.1)$$

Por el datasheet sabemos que $V_{ref} = 1.25$ y si queremos una salida de 5V, la relación entre las resistencias debe ser $\frac{R_1}{R_2} = \frac{5V}{1.25} - 1 = 3$, es decir, R_1 ha de ser 3 veces mayor que R_2 .

Aplicando diferentes tensiones V_{in} a la entrada, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 4.1 Relación entre tensión de entrada y salida

V_{in} [V]	V_{out} [V]
0.320	0.320
0.900	2.76
1	3.6
1.150	4.88
1.171	5

El convertidor empieza a transferir energía a la carga a partir de una tensión en la entrada de 0.9V. No obstante, no consigue regular la tensión en la carga a 5V hasta que la entrada no supera una tensión mínima de 1.171V.

A diferencia de las especificaciones del fabricante se ha observado que una vez arrancado deja de regular a 5V si la tensión de entrada disminuye por debajo de 1.171V.

Con todo esto, podemos prever que este convertidor no es el más adecuado para el diseño de nuestro sistema.

4.1.2. TPS61200

El modelo TPS61200 corresponde a un convertidor elevador perteneciente al fabricante Texas Instruments. Apareció en el mercado el 27 de marzo de 2007 y según el fabricante, es el convertidor conmutado del mercado que trabaja con tensiones de entrada más pequeñas, hasta 0.3V.

La figura 31 muestra la conexión utilizada para la caracterización del convertidor.

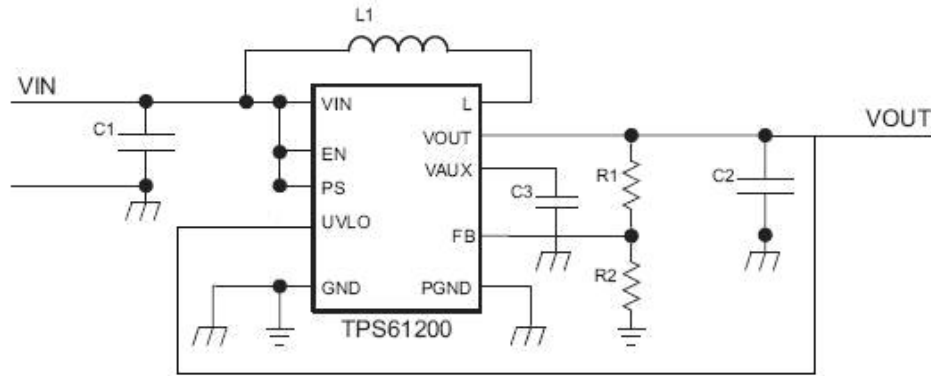


Figura 31.- Conexión típica

Las resistencias R_1 y R_2 determinarán la tensión de salida del convertidor. La expresión que utilizaremos para calcular su valor es la siguiente:

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Donde V_{FB} corresponde a la tensión de realimentación del convertidor y cuyo valor proporcionado por el datasheet del fabricante es de 500mV.

El fabricante también recomienda que el valor de R_2 sea 200kΩ. Así pues, el valor de R_1 para una $V_{out} = 5V$ será:

$$R_1 = 200k\Omega \left(\frac{5V}{500mV} - 1 \right) = 1.8M\Omega \quad (4.3)$$

Experimentalmente, los valores de R_1 y R_2 serán 2.2MΩ y 240 KΩ respectivamente.

El valor de L_1 debe estar comprendido entre 1.5 μH y 4.7 μH. En nuestro caso se utilizará una inductancia de 4.7 μH.

El condensador C_1 debe ser mayor o igual a 4.7 μF, así que escogemos el valor mínimo.

El fabricante nos indica cómo se debe calcular el condensador de salida:

$$C_{out} = 5 \cdot L \cdot \frac{\mu F}{\mu H} = 5 \cdot 4.7 \mu H \cdot \frac{\mu F}{\mu H} = 23.5 \mu F \quad (4.4)$$

Experimentalmente, se utilizará un condensador de 22 μF .

Por último el condensador C_3 debe ser mayor o igual que 100 nF. En este caso, el condensador C_3 corresponde con el condensador C que conectábamos a la salida de la bomba de carga (Ver Figura 18) y el cual debía ser 10 veces menor que C_{cpout} . Por lo tanto, el valor que escogeremos para este ensayo es de 1 μF .

La tensión mínima a la que arranca el convertidor es 370 mV y a la salida obtenemos una tensión regulada a 5V. A continuación se conectan varias resistencias a la salida del convertidor para calcular su rendimiento a diferentes tensiones de entrada. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos:

Tabla 4.2 Rendimiento para resistencia de carga $R_{out} = 5 K\Omega$

V_{in} [V]	I_{in} [mA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.370	118.70	5	998	11.36
0.430	127.40	5	998	9.10
0.800	19.40	5	998	32.15
2	19.60	5	998	12.72

Tabla 4.3 Rendimiento para resistencia de carga $R_{out} = 10 K\Omega$

V_{in} [V]	I_{in} [mA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.370	47.6	5	508	14.42
0.430	40.4	5	508	14.62
0.800	11.84	5	508	26.82
2	28.62	5	508	6.82

Tabla 4.4 Rendimiento para resistencia de carga $R_{out} = 20 K\Omega$

V_{in} [V]	I_{in} [mA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.370	30.3	5	257	9.82
0.430	112.7	5	257	3.06
0.800	7.1	5	257	22.53
2	17.8	5	257	3.59

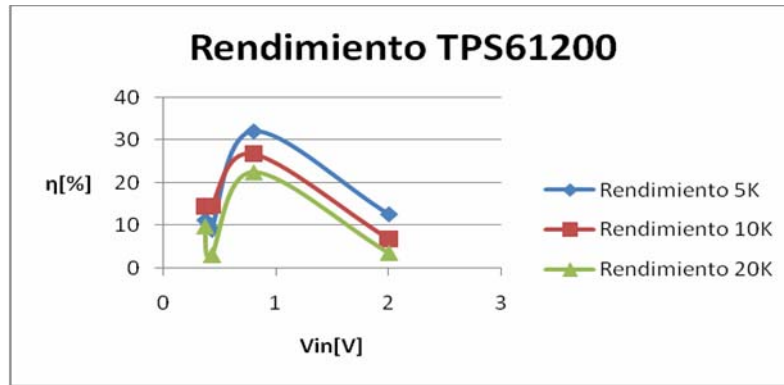


Figura 32.- Curva de rendimiento de TPS61200

En vista de los resultados obtenidos y observando la gráfica, podemos comprobar que a menor resistencia de carga que se conecte a la salida el convertidor tiene mayor rendimiento. Este dato nos puede ayudar a la hora de escoger la aplicación más adecuada para este convertidor, dependiendo de la carga que se ejerza a la salida del circuito.

A primera vista parece que este convertidor podría funcionar correctamente dadas sus características. Admite tensiones de entrada muy bajas, similares a las que puede proporcionar el módulo termoelectrico y a la que puede funcionar la bomba de carga. No obstante, el inconveniente principal es que no admite resistencias muy elevadas de entrada. Para una tensión de Thévenin de 0.350 V, no admite resistencias de entrada de 1Ω, con lo que es de esperar que al conectar la célula Peltier a su entrada tampoco funcione.

4.1.3. S- 8353

El convertidor S-8353 pertenece a Seiko Instruments y está especialmente diseñado para funcionar con la bomba de carga S882Z, con lo que cabe esperar un funcionamiento mucho mejor que los convertidores anteriormente estudiados.

Las principales características de este convertidor son las siguientes:

- La tensión de arranque es de 0.9V, adecuado para la conexión y correcto funcionamiento con la bomba de carga.
- Tensión de salida regulada internamente de 3V. Suficiente para la alimentación de determinados circuitos electrónicos.
- El consumo de corriente de alimentación es de 18.7 μA.

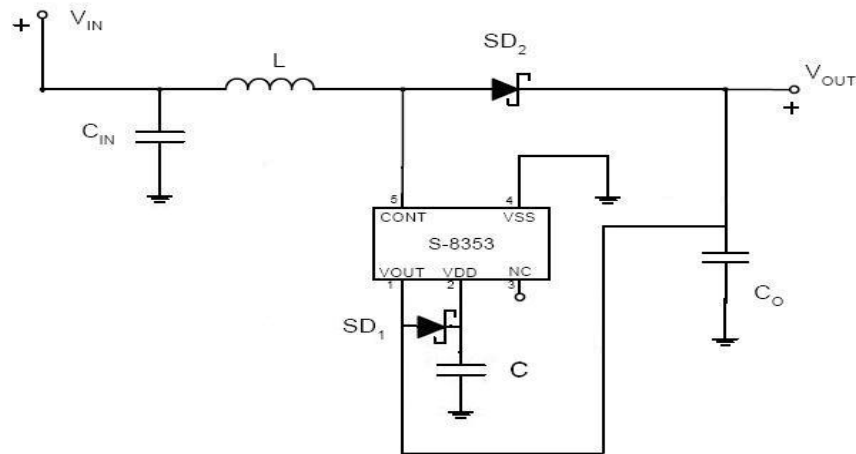


Figura 33.- Esquema de conexión de los componentes externos

Siguiendo las indicaciones del datasheet calculamos los valores de los elementos externos del convertidor:

$L = 22 \mu\text{H}$.

Diodos Schottky BAT47.

$C_{IN} = 22 \mu\text{H}$.

$C_O = 33 \mu\text{H}$.

$C = 1 \mu\text{F}$.

Utilizando el esquema de la figura 33, comprobamos que para el arranque es necesario aplicar una tensión en la entrada superior a 0.616 V para iniciar el funcionamiento. Por otra parte, se ha medido el rendimiento a partir de las intensidades de entrada y salida conectando una resistencia de carga. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.5 Rendimiento para resistencia de caga $R = 5\text{K}\Omega$

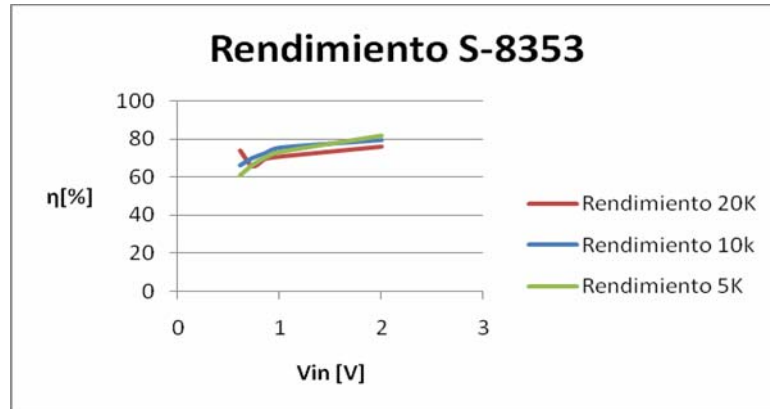
$V_{in} [\text{V}]$	$I_{in} [\mu\text{A}]$	$V_{out} [\text{V}]$	$I_{out} [\mu\text{A}]$	$\eta [\%]$
0.616	4730	3	590	60.74
0.736	3630	3	590	66.25
0.860	2930	3	590	70.24
1.07	2420	3	590	73.14
2	1080	3	590	81.94

Tabla 4.6 Rendimiento para resistencia de caga $R = 10\text{K}\Omega$

$V_{in} [\text{V}]$	$I_{in} [\mu\text{A}]$	$V_{out} [\text{V}]$	$I_{out} [\mu\text{A}]$	$\eta [\%]$
0.616	2200	3	300	66.41
0.736	1740	3	300	70.27
0.860	1440	3	300	72.67
1.07	1190	3	300	75.63
2	565	3	300	79.64

Tabla 4.7 Rendimiento para resistencia de carga $R = 20\text{ K}\Omega$

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.616	1000	3	152	74
0.736	938	3	152	66.05
0.860	760	3	152	69.76
1.07	643	3	152	70.91
2	300	3	152	76

**Figura 34** Curva de rendimiento de S-8353

Se observa que para las mismas cargas de salida utilizadas en el apartado anterior, este convertidor proporciona mejores rendimientos. Además se puede ver que las curvas son casi idénticas, por lo que se puede suponer que tiene el mismo comportamiento para cualquier carga que se conecte a la salida.

En principio cabe esperar que este convertidor conectado a la bomba de carga funcione a la perfección, ya que ambos pertenecen al mismo fabricante y están especialmente diseñados para esta aplicación.

5. Célula Peltier

5.1. Criterios de selección

La célula Peltier tiene un comportamiento aproximadamente lineal por lo que es posible modelarla por su resistencia y tensión Thévenin. Tal y como se verá en el siguiente apartado, las condiciones de funcionamiento de la bomba de carga y el convertidor conmutado de Seiko indican una tensión mínima de Thévenin de 0.348 V y una resistencia máxima de 56 Ω para esa misma tensión.

Con objeto de escoger el módulo termoeléctrico más apropiado para nuestra aplicación debemos definir las principales características que debe cumplir.

En primer lugar se debe tener en cuenta que la salida en tensión del módulo es proporcional al número de termopares y al gradiente de temperatura entre la zona fría y la zona caliente. Con lo que debemos asegurar el máximo gradiente posible entre las dos zonas y el máximo número de termopares.

La tensión de salida que podemos obtener con una célula Peltier se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V = \frac{(S_p - S_n) \cdot \Delta T}{2} \quad (5.1)$$

Donde S_p y S_n son el coeficiente Seebeck en los terminales n y p de la célula Peltier, ΔT la diferencia de temperaturas entre placas y V la tensión de salida del módulo. El coeficiente Seebeck del Telurio Bismuto con el que se fabrican la mayoría de células Peltier es ± 0.2 mV/ $^{\circ}$ C y considerando una tensión mínima de funcionamiento del acondicionador de 300mV, podemos concluir que son necesarios 4687 termopares. Este número es mucho mayor del que se utiliza en las células Peltier comerciales. Se puede reducir significativamente el número de termopares utilizando un radiador con un área de radiación mayor que la del módulo termoeléctrico.

La diferencia de temperaturas que existe entre las resistencias térmicas que forman el sistema depende de la relación (5.2). Así, el salto de temperaturas en la célula Peltier ΔT_P se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta T_P = \frac{R_{TEG}}{R_{body} + R_{air}} \quad (5.2)$$

Donde R_{TEG} , R_{air} y R_{body} , son las resistencias térmicas del módulo termoeléctrico, aire y cuerpo respectivamente. Para que esta diferencia de temperaturas sea la mayor posible se puede optar por las siguientes opciones:

- Incrementar la resistencia térmica de la célula Peltier en comparación con las demás, aumentando el espesor o disminuyendo la superficie del módulo.
- Disminuir la resistencia del aire con radiadores.
- Disminuir la resistencia corporal colocando el módulo en zonas del cuerpo donde se recoja mayor flujo de calor.

Como se verá en el siguiente apartado, los precios de células Peltier que encontramos en el mercado son bastante elevados, con lo que este es un detalle que debemos cuidar.

Con todo esto, los principales criterios de selección de las células Peltier son:

- Máximo número de termopares.
- Mínimas dimensiones del módulo termoeléctrico.
- Mínimo precio.

5.2. Disponibilidad en el mercado

Hoy en día existen varias decenas de fabricantes de módulos termoeléctricos, aunque este mercado está creciendo rápidamente. Entre todos los mercados, los que se alzan con más fuerza son el norteamericano con Melcor y Marlow como sus máximos representantes y el ruso con RMT Ltd y SCTB NORD.

Es difícil comparar los precios de los módulos termoeléctricos comerciales, debido a que las características de fabricación difieren en gran medida entre un fabricante y otro. En cualquier caso, los precios suelen oscilar entre 30€ y 100€. Los precios son tan elevados debido a la escasez de algunos de los materiales con los que se fabrica y el mercado reducido que existe.

Los materiales con los que se fabrican los módulos termoeléctricos dependen de su aplicación final. El material más utilizado actualmente y el más apropiado para nuestra aplicación es una aleación de Bismuto Telurio. Otros materiales con los que se fabrican células Peltier son el Seleniuro de Antimonio, Telururo de Plomo y Siliciuro de Germanio.

En cuanto al tamaño de los módulos comerciales, normalmente se suelen encontrar tamaños a partir de 7 mm² o mayores, aunque también se pueden encontrar de menor tamaño. Existen varios motivos por los que su tamaño es relativamente tan grande. En primer lugar, la fragilidad de los materiales mencionados anteriormente es una limitación importante en cuanto a dimensiones de fabricación se refiere. Por otra parte, los módulos de dimensiones menores tienen una resistencia eléctrica mayor y la gran mayoría de módulos termoeléctricos se usan como refrigeradores, donde conseguir una resistencia eléctrica pequeña es un factor de mérito importante.

La siguiente tabla detalla las características fundamentales de las células más apropiadas para el proyecto.

Tabla 5.1 Modelos de células Peltier y sus características

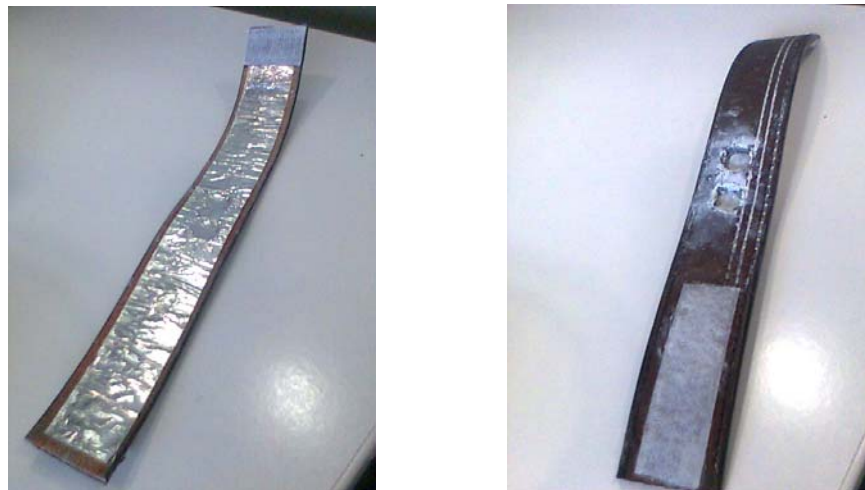
Fabricante	Modelo	Nº termopares	Dimensiones [mm ²]
RMT Ltd	1MD04-127-15	127	9.8 x 9.8
SCTB NORD	TM-95-0.6-3.9	95	16 x 16
Melcor	CP0.8-127-06L	127	25 x 25
Therapeutics.com	BRM8-0.45-1.3	69	3.4 x 3.4

5.3. Selección de soporte físico para la conexión térmica del cuerpo humano.

La parte del cuerpo que se utilizará para alimentar la célula Peltier, como se ha comentado en capítulos anteriores, será la muñeca.

Puesto que es difícil mantener durante el tiempo necesario la mano en la misma postura se necesita un soporte físico que maximice la comodidad del usuario y que a la vez permita el funcionamiento correcto del sistema. Cualquier variación en la postura de la mano o los procesos fisiológicos y ambientales que sucedan (sudor, cambios de temperatura...) pueden modificar el funcionamiento de la célula Peltier.

En un principio se pensó en un soporte físico en forma de pulsera. De esta forma, se evitaría el cambio de posición de la muñeca respecto al módulo termoeléctrico y maximizaría la superficie de contacto. Se probó con dos células Peltier insertadas en dos orificios circulares realizados en un cinturón de cuero (Ver Imagen 1)

**Imagen 1.- Primera idea de soporte físico**

El interior de la pulsera se forró con un papel de material conductor para captar el máximo calor posible de la muñeca. A la vez, el cuero del cinturón servía como aislante obligando así al flujo de calor a transmitirse por las células. En el

diseño de este soporte físico se debía añadir un disipador. Esta fue la causa por la que se desechó esta primera idea. El disipador tiene unas dimensiones demasiado grandes como para poder acoplarlo adecuadamente a la pulsera. Además, como es rígido, la pulsera no se ceñía a la muñeca, con lo que el funcionamiento de los módulos termoelectricos no era el adecuado.

Más tarde se pensó en un soporte más efectivo aunque más incómodo para el usuario, ya que durante el funcionamiento del sistema se debe mantener la mano en la misma posición y ejerciendo la misma presión durante un largo intervalo de tiempo.

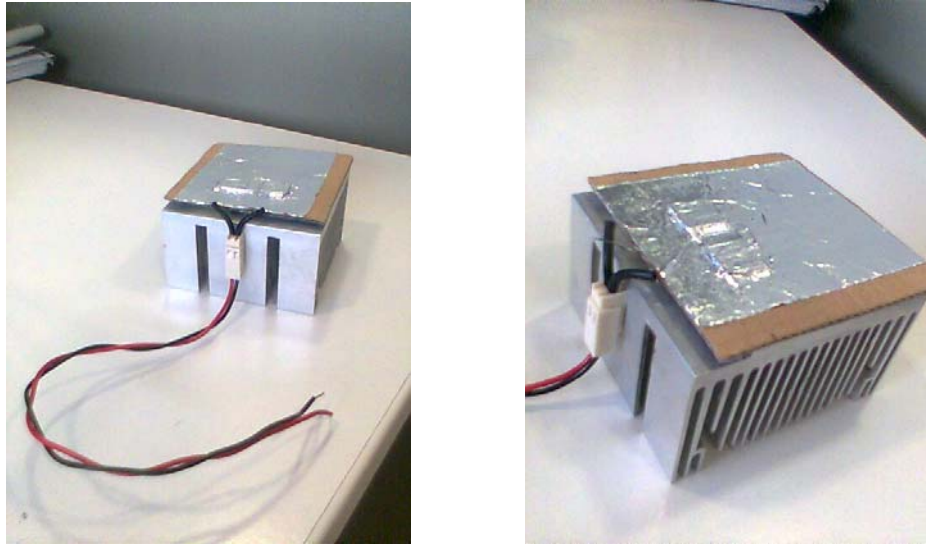


Imagen 2.- Segunda idea de soporte físico

En esta ocasión también se probó el prototipo con dos módulos termoelectricos. El soporte consiste en un radiador sobre el cual se colocó un cartón para impedir que la mano toque la superficie del mismo y así conducir el flujo de calor por las células Peltier. Se realizaron dos agujeros cuadrados iguales al área de las células Peltier, donde las mismas se introdujeron. Entre el radiador y las células también se aplicó pasta térmica para reducir la caída temperatura entre las superficies de contacto. Por último, en la parte superior del cartón y de las células (parte caliente), se colocó un papel conductor.

Cabe destacar que se han probado variaciones de este soporte utilizando diferentes radiadores y materiales conductores térmicos, cuyos resultados se muestran en el apartado 5.4.

5.4. Caracterización eléctrica del sistema.

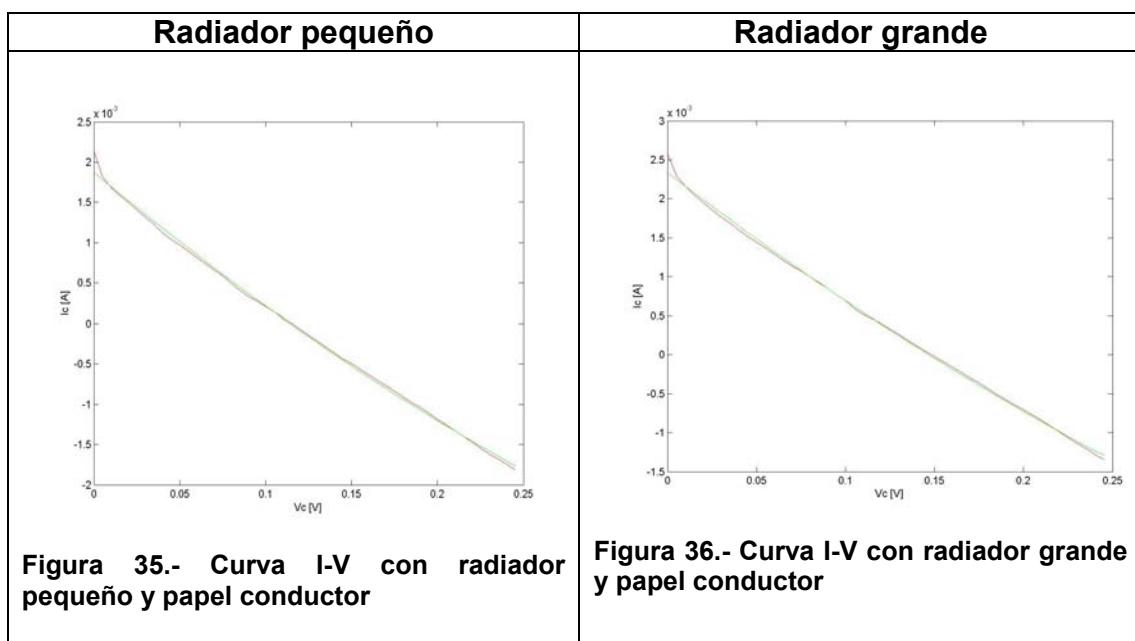
Para la caracterización del sistema se aplicará, mediante una fuente de tensión controlada, una serie de tensiones a la célula Peltier y con un amperímetro se determinará la intensidad que circula por ella en cada instante. La fuente se controlará mediante el programa Labview y los resultados se utilizarán para

determinar la curva I-V, la curva de potencia y la resistencia eléctrica de la célula Peltier.

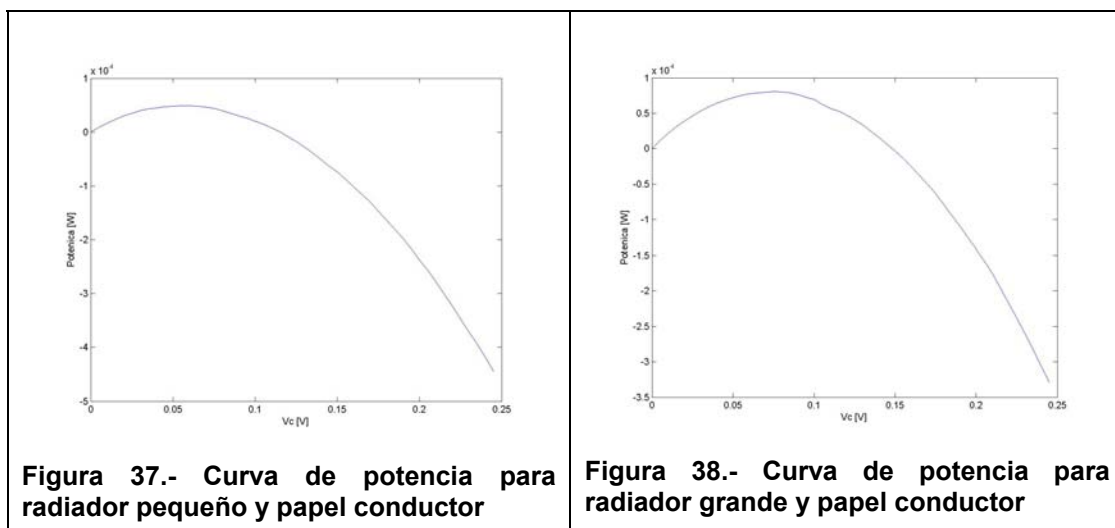
Las pruebas se realizarán a diferentes temperaturas, aunque éstas no sean muy exactas debido a los cambios de temperatura en el laboratorio y los cambios que se producen en el organismo provocado por la temperatura ambiente.

Los primeros ensayos tuvieron como objetivo determinar cuál de los dos radiadores disponibles era el más adecuado. Para tal fin, se midieron diferentes características con cada uno de ellos utilizando el soporte de la Imagen 2. Los resultados obtenidos a 25°C de temperatura ambiente son los siguientes:

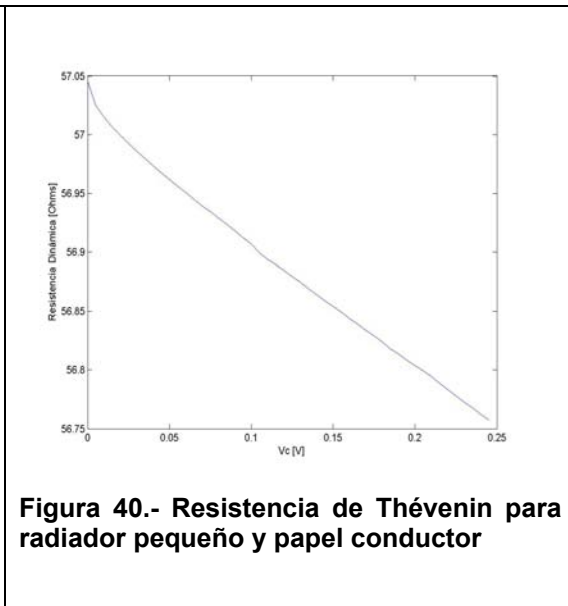
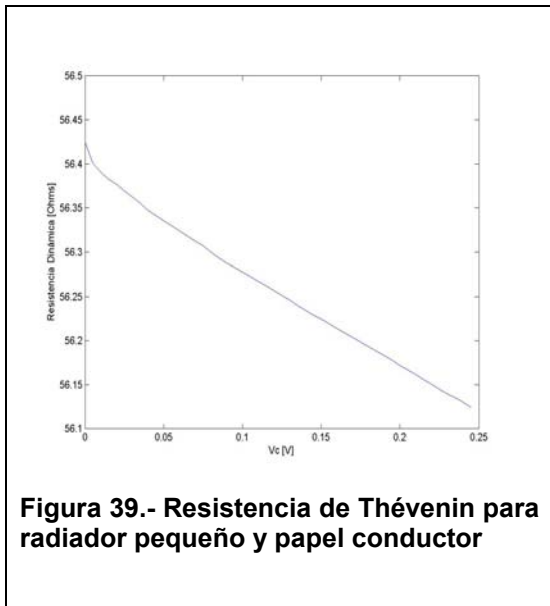
Curva I-V



Curva de Potencia



Resistencia

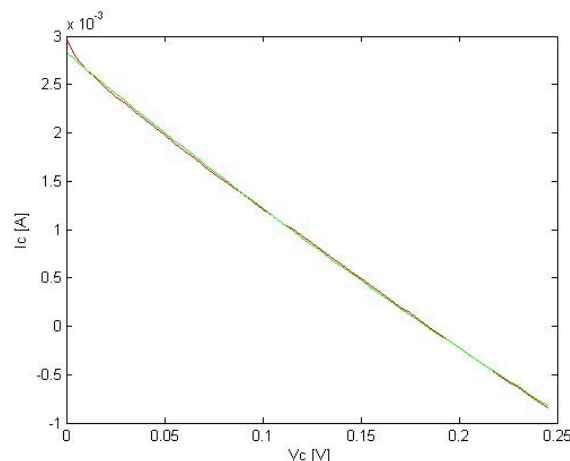


Las pruebas se realizaron en días distintos por lo que se presume que las condiciones ambientales y del organismo podrían ser diferentes. En cualquier caso se realizaron gran número de pruebas obteniendo siempre resultados similares a los que se muestran en las gráficas.

Estas gráficas corresponden a dos células Peltier conectadas en serie. Observando las curvas I-V y de potencia se deduce que el disipador que más nos conviene utilizar es el de mayor tamaño. No obstante su resistencia de Thévenin es ligeramente más grande, tan solo 1 Ω , que en el caso del radiador pequeño.

En otras pruebas se han realizado medidas a temperatura ambiente mayor, concretamente a 27°C. Los resultados nos permiten observar cómo afecta a la captación energética una disminución de la resistencia térmica del cuerpo consecuencia de un aumento de la temperatura. Estos resultados se han realizado utilizando diferentes materiales conductores sobre el soporte físico con radiador grande.

Curva I-V



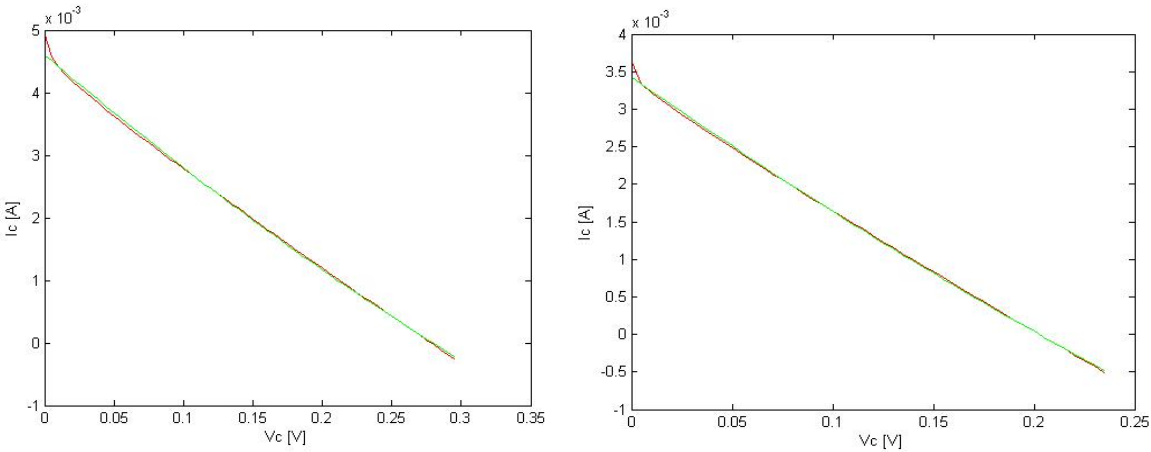


Figura 42.- Curva I-V utilizando cobre (izquierda) y acero inoxidable (derecha)

Se aprecia con claridad que se obtiene mayor potencia eléctrica con el cobre.

Resistencia

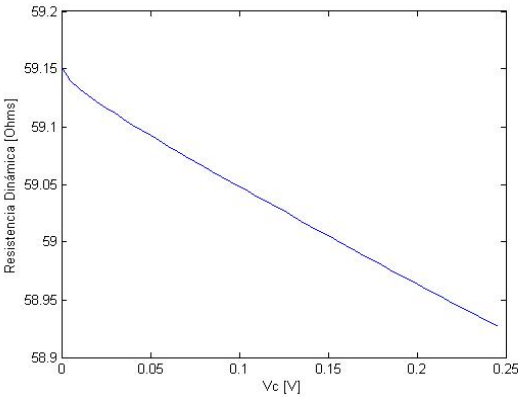


Figura 43.- Resistencia de Thévenin utilizando papel conductor

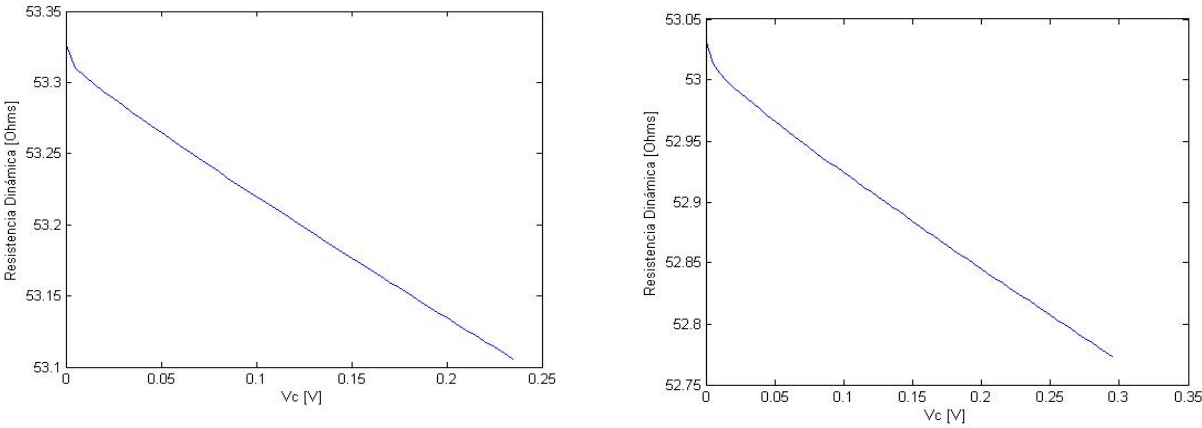


Figura 44.- Resistencia de Thévenin utilizando cobre (izquierda) y acero inoxidable (derecha)

Según se muestra en la figura, la resistencia Thévenin más pequeña se obtiene utilizando una plancha de acero inoxidable como conductor térmico, aproximadamente 6Ω menos que con el papel conductor que se pensaba utilizar en un principio. Aunque el cobre no sea el que menor resistencia de Thévenin tiene a 0 V, sigue siendo una buena opción a la hora de escoger el material conductor definitivo en el diseño final.

Potencia

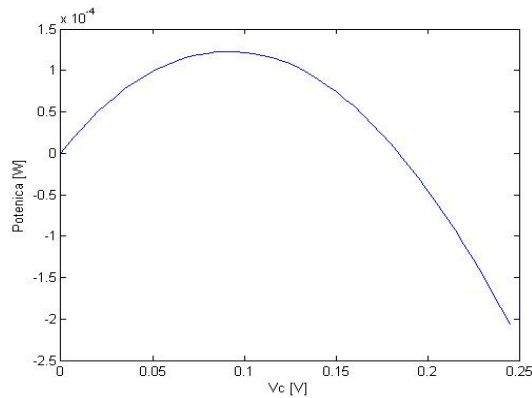


Figura 45.- Curva de potencia utilizando papel conductor

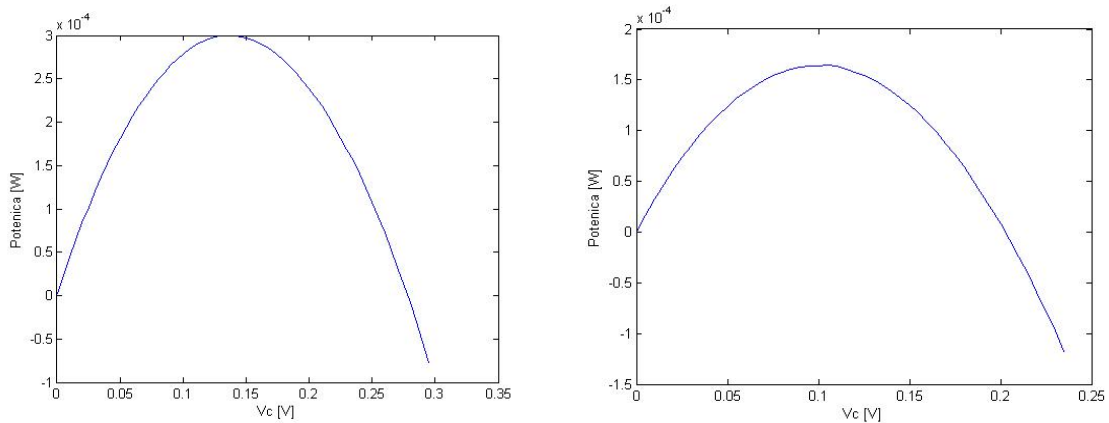


Figura 46.- Curva de potencia utilizando cobre (izquierda) y acero inoxidable (derecha)

Nótese en estos resultados que el cobre es el material más óptimo ya que da lugar a mayor tensión Thévenin y potencia máxima.

6. Diseño del sistema de captación de energía

En vista de los resultados que hemos ido obteniendo para las diferentes partes que componen el sistema, podemos exponer a continuación cuáles son los componentes más óptimos para el objetivo del proyecto.

Una vez seleccionado todos los componentes se realiza la caracterización del sistema, primero alimentado por una fuente de alimentación continua y finalmente alimentado por la tensión obtenida del módulo termoelectrico.

6.1. Selección de componentes

Los componentes que formarán cada etapa del diseño se han escogido según los resultados obtenidos en su caracterización y son los que mejor características han mostrado de forma individual.

Como se ha justificado en apartados anteriores, la parte del cuerpo que se utilizará para aportar el calor suficiente a la célula Peltier es la muñeca.

Para la primera etapa de captación de energía térmica se ha escogido dos células Peltier modelo 1MD04-127-15 del fabricante ruso RMT Ltd. Es la célula Peltier con mayor número y densidad de termopares encontrada. Además se pudo conseguir varias muestras gratuitas, siendo su precio de mercado 45.70€.

La segunda etapa corresponde a la bomba de carga. El modelo escogido pertenece al fabricante Seiko. Este componente fue el punto de partida del proyecto y a partir de sus características se fueron escogiendo los demás componentes del sistema. El modelo de bomba de carga es el S-882Z cuyo precio estimado de mercado es de 2€.

Por último, determinamos que el convertidor conmutado que mejores características ha presentado para este tipo de aplicación es el convertidor modelo S-8353 de Seiko con precio estimado de 2€

El diseño final del sistema de acondicionamiento de energía se muestra en la siguiente figura:

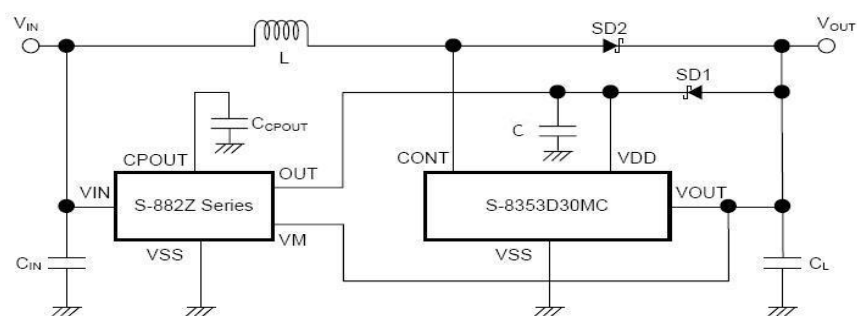


Figura 47.- Diseño final del circuito elevador de tensión

Los valores de los componentes utilizados en el esquema eléctrico anterior son:

$$L = 22 \mu\text{H}$$

$$C_{\text{CPOUT}} = 10 \mu\text{F}$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$C_{\text{IN}} = 33 \mu\text{F}$$

$$C_L = 22 \mu\text{F}$$

$$\text{SD1 y SD2} = \text{Diodos BAT47}$$

6.2. Caracterización del sistema de acondicionamiento de energía.

Una vez montado el prototipo del acondicionador de energía se ha comprobado que se produce el arranque a partir de una tensión mínima de 348 mV. Cuando C_{cpout} alcanza los 2V por la acción de la bomba de carga, se descarga sobre la capacidad C y empieza a funcionar el convertidor conmutado. Debido al lazo de control interno del convertidor, la tensión en la carga queda regulada a 3V. En la caracterización del prototipo se han realizado dos ensayos; estimación de rendimiento y determinación de la resistencia Thévenin máxima de funcionamiento.

En las siguientes tablas se muestran los rendimientos obtenidos en diferentes condiciones de funcionamiento.

Tabla 6.1 Rendimiento del circuito elevador de tensión para una resistencia de carga de 5 K Ω .

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.35	9450	3	590	53.51
0.8	3090	3	590	71.60
1.5	1510	3	590	78.14

Tabla 6.2 Rendimiento del circuito elevador de tensión para una resistencia de carga de 10 K Ω .

V_{in} [V]	I_{in} [μA]	V_{out} [V]	I_{out} [μA]	η [%]
0.35	4370	3	300	58.84
0.8	1560	3	300	72.11
1.5	782	3	300	76.72

Tabla 6.3 Rendimiento del circuito elevador de tensión para una resistencia de carga de 20 K Ω .

V_{in} [V]	I_{in} [μ A]	V_{out} [V]	I_{out} [μ A]	η [%]
0.35	2350	3	152	55.44
0.8	825	3	152	69.09
1.5	416	3	152	73.07

Se observa que el rendimiento es mucho mayor que el obtenido en la caracterización de la bomba de carga. En la siguiente gráfica se puede ver este hecho con mayor claridad.

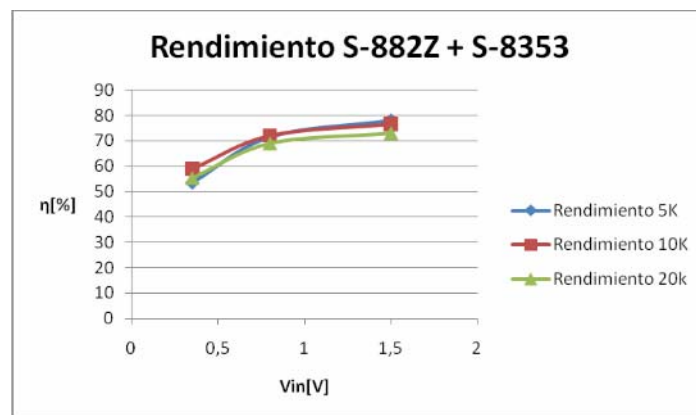


Figura 48.- Curva de rendimiento del circuito acondicionador de energía

Finalmente, se muestra en la tabla 6.4 las resistencias de Thévenin máximas de la fuente de entrada que permiten el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 6.4 Resistencia máxima a la entrada

V_{in} [mV]	R_{in} [Ω]
348	56
400	56
450	62
500	68

Recuérdese que la resistencia Thévenin era de 53 Ω para dos células Peltier conectadas en serie y utilizando una plancha de cobre como conductor térmico. Consecuentemente se espera que el sistema de acondicionamiento de energía funcione correctamente.

6.3. Resultados obtenidos con la célula Peltier

Por último debemos realizar un ensayo final del sistema completo. Para ello, se alimentará el circuito acondicionador de energía mediante dos células Peltier conectadas en serie y con el soporte físico detallado en el apartado 5.3 de esta memoria.



Figura 49.- Regulación a 3V del sistema acondicionador de energía alimentado por el módulo termoeléctrico sin ninguna resistencia de carga de salida. La señal amarilla corresponde a V_{cpout} y la verde a la salida regulada del sistema completo.

Se conectarán varias resistencias de carga a la salida del sistema completo con objeto de determinar la carga máxima que se puede alimentar con este circuito y la potencia máxima que podemos proporcionar.

La resistencia de carga que garantiza la máxima potencia de salida es 220 K Ω , obteniendo una potencia de 22 μ W, aunque no se consigue regular la salida a 3V. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para diferentes resistencias de carga.

Tabla 6.5 Potencia y tensión de salida en función de la resistencia de carga.

R_L [K Ω]	V_{out} [V]	P_{out} [μ W]
82	1.16	16.40
100	1.23	15.12
220	2.2	22
330	2.66	21.44
430	3	20.93
510	2.91	16.60
750	2.85	10.83

En la siguiente gráfica se aprecia con mayor claridad la curva de potencia dependiendo de la resistencia de carga que se conecte a la salida.

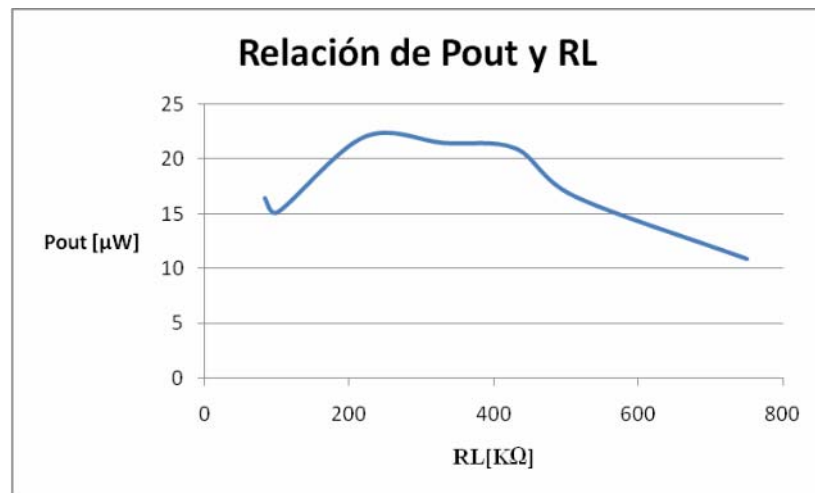


Figura 50.-Curva de potencia del sistema completo

Se puede concluir que el sistema diseñado será capaz de alimentar circuitos cuya potencia de entrada necesaria sea menor o igual a 22 μW aproximadamente.

La relación entre la tensión de salida y la resistencia de carga se muestra en la siguiente figura, donde se aprecia que a mayor R_L la tensión de salida aumenta, regulándose a los 3V deseados.

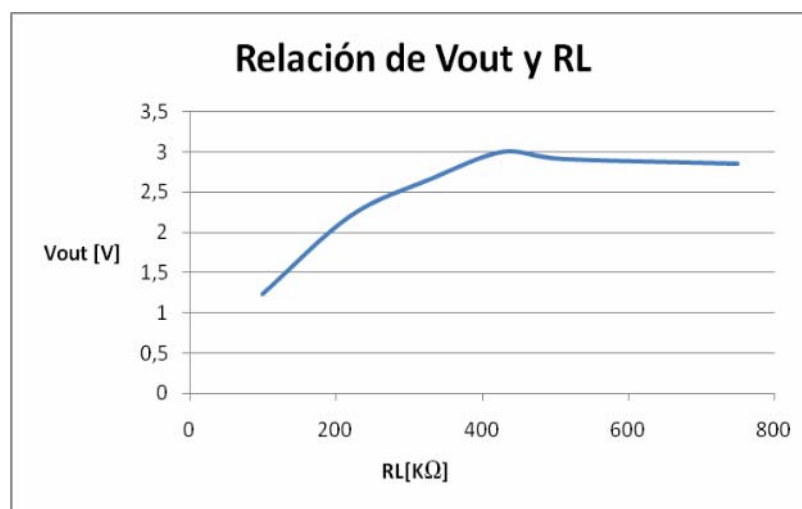


Figura 51.- Relación entre la tensión de salida y la resistencia de carga

7. Conclusiones

Es complicado aprovechar la energía disipada del cuerpo humano debido a los numerosos factores que influyen en este proceso. Lo importante en este caso es encontrar la parte del cuerpo adecuada para esta función y más importante aún es encontrar un soporte físico para que la transferencia de energía se haga de la forma más eficiente posible. Por todos estos motivos se escogió la muñeca como fuente de calor para la célula Peltier.

Las células Peltier que se encuentran en el mercado se utilizan generalmente para el control de temperatura y como refrigeradores. De ahí la dificultad de encontrar un módulo apropiado para nuestra aplicación que cumpliera los requisitos de tamaño y número de termopares que se planteó.

Finalmente se ha decidido utilizar dos células Peltier conectadas en serie después de observar los resultados obtenidos en su caracterización. Una sola célula Peltier no proporciona una tensión suficiente como para arrancar la bomba de carga. Por otro lado, un número mayor de células Peltier daría lugar a una resistencia de Thévenin mayor que impediría el funcionamiento del sistema.

La tecnología SOI, utilizada en la fabricación de la bomba de carga S-882Z, permite trabajar a tensiones de entrada muy bajas permitiendo la conexión con la célula Peltier. Además, la bomba de carga con la que trabajamos tiene un consumo de intensidad pequeño por lo que la resistencia que ejerce el módulo termoelectrico a la entrada apenas influye en su funcionamiento.

Se considera que el convertidor conmutado conectado a la bomba de carga es la mejor opción como circuito elevador de tensión. El rendimiento de la bomba de carga no es demasiado elevado por lo que al final del proceso se perdería una gran cantidad de energía. Por otro lado, la utilización de únicamente el convertidor conmutado como elevador de tensión no sería posible debido a que éstos no pueden trabajar durante el arranque a las tensiones proporcionadas por la célula Peltier.

Por lo tanto, la mejor de las alternativas es utilizar la bomba de carga como circuito arrancador del convertidor conmutado. De esta forma se aumenta el rendimiento del sistema y se consigue alimentar cargas de mayor potencia.

Por último, después de alimentar el circuito completo con la célula Peltier se determina que la potencia máxima que se puede proporcionar con este sistema es 22 μ W. No obstante, la salida en este caso es 2.2V. Conectando resistencias de carga mayores de 220 K Ω se consiguen tensiones de salida de 3V.

8. Bibliografía

- [1] Vladimir Leonov, Tom Torfs, Paolo Fiorini, Chris Van Hoof, “*Thermoelectric Converters of Human Warmth for Self- Powered Wireless Sensor Nodes*”, IEEE 2007.
- [2] Naoto Kakuta, Shintaro Yokoyama, Kunihiro Mabuchi, “*Human Thermal Models for Evaluating Infrared Images*”, IEEE November/ December 2002.
- [3] Loreto Mateu, Cosmin Codrea, Néstor Lucas, Markus Pollak, Peter Spies, “*Human Body Energy Harvesting Thermogenerator for Sensing Applications*”, IEEE 2007.
- [4] G. Gromov, “*Thermoelectric Cooling Modules*”, RMT Ltd: <http://www.rmtltd.ru>
- [5] Rafael Palacios, Miguel Angel Sanz- Bobi, “*Thermal Properties of Commercial Thermoelectric Modules*”, IEEE 1997.
- [6] D.M. Rowe, G. Min, “*Design Theory of Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation*”, November 1996.
- [7] Simon Lineykin, Sam Ben- Yaakov, “*Spice compatible equivalent circuit of the energy conversion processes in thermoelectric Modules*”, IEEE 2004.
- [8] Simon Lineykin, Shmuel Ben- Yaakov, “*Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules*”, IEEE 2007.
- [9] Daniel Mitrani, José Antonio Tomé, Jordi Salazar, Antoni Turó, Miguel Jesús García, Juan Antonio Chávez, “*Methodology for Extracting Thermoelectric Module Parameters*”, IEEE 2005.
- [10] John M. Damaschke, “*Design of a Low- Input- Voltage Converter for Thermoelectric Generator*”, IEEE 1997.
- [11] “*TI Boost Converter Enables Solar and Micro-Fuel Cell Innovation in Portable Electronics*”, Press realases: <http://www.medicaldevice-network.com/contractors/embedded/texas-instruments/press4.html>

Fabricantes célula Peltier consultados:

Ferrotec America, <http://www.ferrotec-america.com>
Marlow Industries, <http://www.marlow.com>
RMT Ltd., <http://www.rmtltd.ru>
SCTB NORD, <http://www.sctbnord.com>
Tellurex, <http://www.tellurex.com>
Melcor, <http://www.melcor.com>
TE Technology, <http://totech.com>
ThermoElectric Cooling America, <http://www.thermoelectric.com>